

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Prosessi- ja materiaalitekniikan osasto
Puunjalostustekniikan laitos

PASI NISSINEN

PAINEHIOKKEEN LUJUUSOMINAISUUKSIEN LUONNEHTIMINEN KUITUFYSIKAA-
LISTEN OMINAISUUKSIEN AVULLA

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 4.6.1993.

Työn valvoja
Työn ohjaaja

Professori Hannu Manner
Dipl.ins. Teuvo Honkanen

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Puunjalostustekniikan laitos
Kirjasto

Tekijä, työn nimi

Pasi Nissinen
Painehiokkeen lujuusominaisuuksien luonnehtiminen kuitu-
fysikaalisten ominaisuuksien avulla

Päivämäärä

31.5.1993

Sivumäärä

90 sivua

Osasto, laitos Prosessi- ja materiaaalitekniikan osasto
Puunjalostustekniikan laitos

Professuuri

PUU-21 Paperitekniikka

Työn valvoja

Professori Hannu Manner

Työn ohjaaja

Dipl.ins. Teuvo Honkanen

Diplomityön tavoitteena oli tilastomatemattisin keinoin lineaarisen regressioanalyysin avulla selvittää, voidaanko massasulpun kuitu-
fysikaalisilla ominaisuuksilla estimoida valmiin laboratorioarkin
ominaisuuksia.

Mekaanisen massan lujuus riippuu lähinnä nauhamaisten ja säiemäisten
soluseinän osasten määrästä massassa. Tällaiset osaset syntyvät tra-
keidin S_2 - kerroksen purkaantuessa, kun kuidussa olevat halkeamat
kasvavat ja lisääntyvät. Purkaantumisprosessi on todennäköisesti
hionta- tai hiertoprosessin sekundaarivaihe. Myös mekaanisen massan
komponenttien partikkelien muodolla on tärkeä merkitys paperin lu-
juusominaisuuksiin: hiokemassa, jolla on hyvät lujuusominaisuudet,
sisältää tahmeaa tai limamaista hienoaainetta (kuituplasmaa tai lima-
ainesta), kun taas hiokemassa, jolla on huonommat lujuusominaisuudet,
sisältää jyvämäistä hienoaainetta (jauhoainesta).

Lisäksi on osoitettu, että parempi hienoaaine (kuituplasma) on yh-
teydessä pitkiin ja kapeisiin kuituihin, kun taas huonompi hienoaaine
(jauhoaines) esiintyy yhdessä tikkuisen ja möhkälämäisen pitkäkuitu-
fraktion kanssa.

Näytteet diplomityötä varten otettiin Voikkaan painehiomon 1-linjan
painelajittelun akseptista (20 kp), rejektijauhatuksen jälkeisen
lajittelun akseptista (20 kp) ja pyörrepuhdistuslaitoksen akseptista
(10 kp). Laboratorioarkkien valmistus ja testaus suoritettiin Kaukas
Oy:n tutkimuskeskuksessa Lappeenrannassa.

Kuitufysikaalisilla ominaisuuksilla tarkoitetaan tässä yhteydessä
kuitujen pituus- ja leveysjakamaa, joka määritettiin PulpExpertin
kuituanalyysillä, jonka mittausmenetelmä perustuu kuva-analyysiin.
Kuva-analyysissä valaistusta kuitunäytteestä, jonka sakeus on n. 0,015
%, otetaan valokuva mustaa taustaa vasten, jolloin yksittäiset kuidut
erottuvat taustasta vaaleina. Kuva digitoidaan ja muutetaan pikseleik-
si. Kuiduille etsitään keskiviiva ja paras mahdollinen reunaviiva.
Erotus taustasta tapahtuu intensiteettieron perusteella.

Kuituanalyysissä kuidut jaetaan seitsemään pituus- ja viiteen leveys-
luokkaan eli 7 x 5 matriisiin, joka sisältää 35 kuituluokkaa. Kuitujen
pituusjakaman perusteella lasketaan myös pituuspainotettu kuidunpi-
tuus.

Mallinmuodostuksessa käytettiin apuna regressioanalyysiä (pienimmän
neliösumman keinoa) sekä muuttujina PE:n antamaa tietoa ja laborato-
riofreenessia, koska PE-freenessia ei määritetty kaikista koepisteis-
tä. Etsittäessä estimointimalleja eri ominaisuuksille käytettiin
mallien selittäjinä PE-luokkia, neliöjuurimuunnoksia PE-luokista, PE-
kuidunpituutta, laboratoriofreenessia sekä kaikkien näiden yhdistel-
miä. Selittäjien valintaperusteina käytettiin parasta saavutettua
sovitettua selityssastetta, joka kertoo koko mallin sopivuudesta seli-
tettävälle ominaisuudelle, sekä lisäksi mallissa olevan yksittäisen
selittäjän P-arvoa, joka kertoo k.o. muuttujan ja selitettävän ominai-
suuden välisestä korrelaatiosta. Parhaat mallit saatiin muodostettua
veto- ja repäisyindeksille sekä Bendtsen-ilmanläpäisevyydelle, joiden
selityssasteet olivat yli 90 %. Muunnosten mukanaolo mallissa paransi
vain harvoin selityssastetta.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty yhteistyönä PulpExpert Oy:n ja Kaukas Oy:n Voikkaan paperitehtaan toimeksiannosta. Diplomityöhön liittyvät laboratoriokokeet on suoritettu Kaukas Oy:n Tutkimuskeskuksessa Lappeenrannassa.

Haluan osoittaa parhaat kiitokseni työni valvojalle professori Hannu Mannerille sekä ohjaajaryhmäni jäsenille Teuvo Honkaselle, Jouko Rantakokolle, Jouko Lehdolle, Pekka Valokarille ja Olavi Lehtikoskelle.

Lisäksi haluan kiittää tulevaa vaimoani Minnaa kannustuksesta ja henkisestä tuesta, Arja, Tijana ja Pekka Lehtikoskea työhöni liittyvästä käytännön avusta, PulpExpert Oy:n muuta henkilökuntaa teknisistä neuvoista, Pertti Lainista tilastomatematiikan neuvojen antamisesta sekä erityisesti laborantti Sirpa Inkistä, jota ilman tämä diplomityö tuskin olisi valmistunut määräajassa.

Voikkaalla 4.6.1993



Pasi Nissinen

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO	1
2	MEKAANISTEN MASSOJEN OMINAISUUDET	2
3	MEKAANISTEN MASSOJEN MASSAJAKEET	6
3.1	Mekaanisten massojen yleiskuvaus	6
3.2	Pitkien kuitujen pinta	10
3.3	Mekaanisen massan kuituverkoston koossapysyvyys	12
3.4	Nauhamaisten kalvojen muodostuminen	16
4	MASSAJAKEIDEN VAIKUTUS MASSAN JA PAPERIN OMINAISUUKSIIN	18
4.1	Massan ominaisuudet	18
4.2	Paperin lujuusominaisuudet	19
4.3	Fibrillaatio ja yksittäiskuitujen sitoutumispotentiaali	19
5	MEKAANISTEN MASSOJEN RAKENTEELLISEN KOOSTUMUKSEN KVANTITATIIVINEN ARVI- OINTI	20
5.1	Muototekijämittaus	21
5.2	Massan sitoutumiskyvyn määrittä- menetelmiä	22
5.3	Ominaispintamittaus	22
6	MASSAJAKEIDEN OMINAISPINNAN JA ARKKI- EN OMINAISUUKSIEN VÄLINEN RIIPPU- VUUS	24
7	MEKAANISEN MASSAN KARAKTERISOINTI RAKENTEELLISEN KOOSTUMUKSEN PARAMET- REILLA	27
7.1	Forgacsin karakterisointiparametrit	27
7.1.1	Muototekijä	27
7.1.2	Kuitupituusjakauma	28
7.2	Mannströmin parametrit	28
7.2.1	Sitoutumispotentiaalin mää- rittäminen	30

7.2.2	S:n, d:n ja n:n sekä eri massaominaisuuksien väliset riippuvuussuhteet	31
7.3	Ullmanin parametrit	32
7.4	Ominaispinnan ja freenessin välinen suhde	32
8	TIKKU- JA KUITUMITTAUSMENETELMÄT	34
8.1	Tikkujen vaikutus arkin lujuusominais- uuksiin	34
8.2	Somerville-tikkuseula	35
8.3	PFI-minitikkuseula	36
8.4	Pulmac-tikkuanalysaattori	38
8.5	Tellusond STFI 3000 L -tikku- analysaattori	39
8.6	PQM 400	40
8.6.1	Mittausperiaatteet	40
8.6.2	Näytteenotto	41
8.6.3	Suotautuvuusmittaus	41
8.6.4	Kuidunpituusmittaus	42
8.6.5	Tikkupitoisuusmittaus	43
8.6.6	Mittautarkkuus	44
8.7	PulpExpert	44
8.7.1	Näytteen käsittely	44
8.7.2	Arkinmuodostus ja suotautu- vuusmittaus	45
8.7.3	Arkin käsittely ja sakeus- mittaus	47
8.7.4	Vaaleusmittaus	47
8.7.5	Roska-analyysi	48
8.7.6	Kuituanalyysi	49
8.8	Kajaani FS-100 ja FS-200-kuidunpi- tuusmittarit	50
8.8.1	Kajaani FS-100-mittari	50
8.8.2	Kajaani FS-200-mittari	51
8.9	Bauer-McNett-kuitulajitin	52
9	MASSAN JA PAPERIN OMINAISUUKSIEN ESTIMOINTI	54
9.1	Paperin ominaisuuksien estimointi massan laboratoriomääritysten avul- la	54

9.2	Paperin ominaisuuksien estimointi on-line-laadunvalvontajärjestelmien avulla	55
9.2.1	PQP	55
9.2.2	PulpExpert	57
10	HIOMON OHJAUS LABORATORIO- JA ON-LINE-MÄÄRITYSTEN PERUSTEELJA	58
10.1	Hiokeseosten laatusuureiden estimointi	58
10.2	Hiomakoneen säätöstrategiat	58
10.2.1	Vakio teho	58
10.2.2	Vakio paine	59
10.2.3	Vakio tuotantonopeus	59
10.2.4	Vakio energian ominaiskulu- tus	59
10.2.5	Vakio freeness	59
10.2.6	Integroitu säätöstrategia	60
10.3	Hiomon laadunvalvonta ja ohjaus	60
11	KOKEELLISEN OSAN TAVOITE	62
12	KOESUUNNITELMA JA NÄYTTEENOTTO	62
13	NÄYTTEIDEN LABORATORIOMITTAUKSET	64
14	KUITUANALYYSIN MITTAUSMENETELMÄ	66
14.1	PulpExpert-kuitumatriisi	66
14.2	Mittausperiaate	68
14.3	Toistettavuus	69
15	KOETULOKSET	69
15.1	Mallien muodostusmenetelmä ja mallien selittäjien valinta	70
15.2	Muodostettujen mallien fysikaaliset perusteet	72
15.2.1	Pulmac-tikkupitoisuus	72
15.2.2	Bauer-McNett -kuitulajitteen R30-jae	73
15.2.3	Bauer-McNett -kuitulajitteen R50-jae	73

15.2.4	Bauer-McNett -kuitulajitte-	
	lun R100-jae	74
15.2.5	Bauer-McNett -kuitulajitte-	
	lun R200-jae	74
15.2.6	Bauer-McNett -kuitulajitte-	
	lun P200-jae	75
15.2.7	Vetoindeksi	75
15.2.8	Repäisyindeksi	76
15.2.9	Tiheys	77
15.2.10	Karheus (5 kp)	78
15.2.11	Karheus (1 kp)	78
15.2.12	Bendtsen-ilmanläpäisevyys . . .	78
15.2.13	Valonsirontakerroin	79
15.2.14	Opasiteetti	79
15.2.15	Zero-Span -vetolujuus	80
16	MALLIEN SELITYSASTEET JA LUOTETTAVUU-	
	DEN ARVIOINTI	80
17	YHTEENVETO	82
18	LÄHDELUETTELO	85

KIRJALLISUUSOSA

1

JOHDANTO

Mittausarvojen, joiden avulla luonnehditaan mekaanisia massoja, täytyisi olla ennustettavissa massanvalmistusprosessin tilaa kuvaavien muuttujien avulla ja samalla niiden tulee ennustaa massojen paperinvalmistuspotentiaalia. Tavanomaisien parametrien, kuten freeness, repäisylujuus, puhkaisulujuus jne., ennustettavuus kärsii riittämättömästä prosessin riittämättömästä tuntemisesta. Kuitenkin korrelaatiot näiden fysikaalisten ominaisuuksien välillä viittavat siihen, että ne määräytyvät muutamien massan perusominaisuuksien perusteella.

On osoitettu, että mekaanisen massan pitkäkuitujakeen kuiduilla on taipumus olla jäykkiä ja sen vuoksi ne eivät mukaudu toisiinsa paperirakenteessa. Pitkät kuidut ovat usein myös vain vähän fibrilloituneita, minkä vuoksi tällaisten kuitujen välisten sidosten kosketuspinta-ala saattaa olla pieni.

Mekaanisesta massasta valmistetun paperin verkostolujuus riippuu lähinnä epäsäännöllisen muotoisista nauhamaisista ja säiemäisistä soluseinän osasista, joista suurin osa on peräisin puutrakeidin soluseinän S_2 -kerroksesta. On osoitettu, että nämä nauhat ja säikeet (fibrillit) ovat irtautuneet emätrakeidista S_2 -kerroksen purkaantuessa, kun kuidussa olevat halkeamat kasvavat ja lisääntyvät. Purkaantumisprosessi on mitä todennäköisimmin toinen vaihe hionta- tai hiertovyöhykkeellä, kun kuidut ovat ensin erottuneet toisistaan. Hierteen korkeat lujuusominaisuudet johtuvat ehkä juuri hiertoprosessin kyvystä saada aikaan kuitujen purkaantumista.

Jos puu rikotaan paksuiksi, möhkälemäisiksi osasiksi, eikä hyvin erottuneiksi kuiduiksi, purkaantuminen estyy. Tällaisista osasista saatu hienoaaine on myös möhkälemäistä ja sen vuoksi huonommin sopivaa sidosten muodostamiseen.

Limamaisen ja jauhomaisen hienoaineen ero voidaan selittää juuri e.m. fysikaalisen eron perusteella.

Mekaanisten massojen rakenteellinen koostumus voidaan määritellä kahdella tekijällä: **kuitupituuden painojakaumalla** ja **ominaispartikkelimuotoparametrilla**, joka liittyy mekaanisen massan partikkelien sidospotentiaaliin.

On osoitettu, että arkkien, jotka voivat olla tehty hyvin erilaisista mekaanisista massoista, märkä-, repäisy- ja puhkaisulujuus, katkeamispituus sekä ilmanläpäisevyys ovat lähes kokonaan riippuvaisia massan koostumuksesta. Lisäksi arkkien laatuarvoja on mahdollista ennustaa vain kahden parametrin avulla.

Parametrit ovat pituustekijä L ja muototekijä S. Pituustekijä L määritellään 48 meshin viiralle jääneeksi prosenttiosuudeksi näytteen koko painosta ja se toimii partikkelien kokojakauman mittana. Muototekijä S on 48/100 jakeen hydrodynaaminen ominaispinta-ala. Keskiwakeen ominaispinnan käyttö muototekijänä voi johtua siitä, että keskiwakeen osuus mekaanisesta massasta on suuri ja että keskiwakeen käyttö sulkee pois kuituuntumattoman aineksen ja hienoaineen. Canadian Standard Freeness -testiä käytetään ominaispinnan mittana, vaikkakin hienoainehäviöt freeness-laitteen sihtilevyn läpi vääristävät tuloksia.

Mekaanisen massan valmistusprosessin muutokset, kuten puuaineksen laadun vaihtelu, hiontapaine, kiven pinta, hierrejauhimen tuotantonopeus jne., heijastuvat välittömästi massan partikkelimuotojen ja -kokojen jakaumaan.

2 MEKAANISTEN MASSOJEN OMINAISUUDET

Mekaanista massaa kuvaillaan usein seuraavien testien avulla: freeness, puhkaisulujuus, vetolujuus, repäisylujuus ja bulkki. Myös kuidunpituuslajittelu on eräs paljon käytetty testi, joka suoraan kuvaa massaseosta.

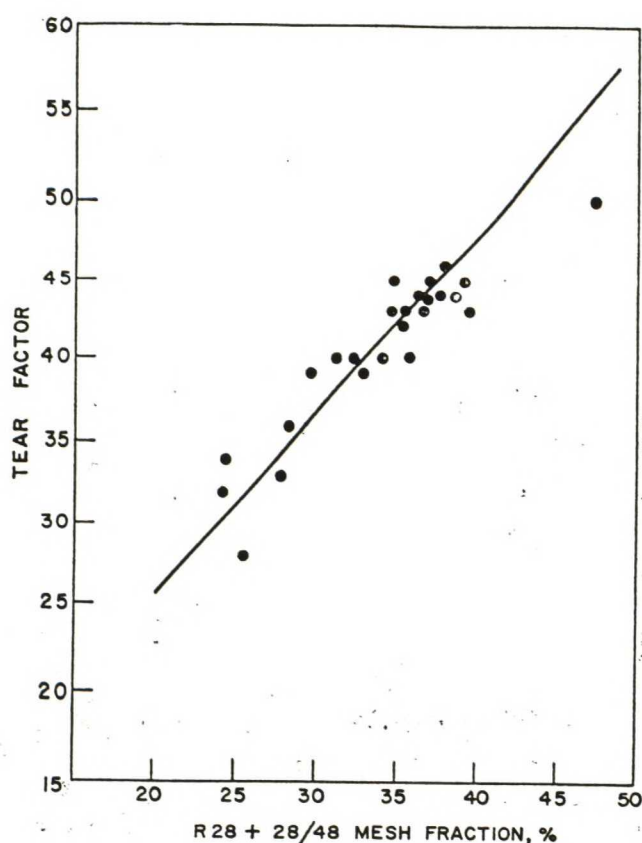
Konventionaalisilla testeillä mitatut ominaisuudet liittyvät vahvasti toisiinsa. Patersonin /2/ käyrä, joka osoittaa freenessin ja puhkaisulujuuden välisen riippuvuuden, on yksi esimerkki.

Puhkaisulujuus ja katkeamispituus korreloivat vahvasti, ja Brauns /3/ on esittänyt teorian katkeamispituuden ja freenessin välisestä suhteesta. Jones /4/ on osoittanut, että kuitupituus, freeness ja bulkki korreloivat hyvin repäisyjuuuden kanssa, kun puhkaisulujuus pysyy vakiona. Bradsleyn /5/ mukaan puhkaisulujuus korreloi puolestaan ilmanläpäisevyyden kanssa.

Vaikka freeness, repäisy- ja puhkaisulujuus sekä bulkki ovat kaikki melko erilaisia massan hyvyysmittauksia, niiden yhteisistä korrelaatioista voidaan tehdä johtopäätöksiä: on olemassa muutamia tärkeitä mekaanisen massan perusominaisuuksia, jotka määräävät sekä suotautumisvastuksen että laboratorioarkkien lujuusominaisuudet ja bulkin.

Keskimääräinen kuitupituus on yksi mekaanisen massan perusparametreista. Kuva 1 osoittaa vahvan korrelaation pitkien kuitujen osuuden (Bauer-McNett-lajittimen R28 ja 28/48 jakeet) ja repäisyindeksin välillä.

Kressin ja Brainerdin /6/ tutkimusten mukaan arkkien, jotka on tehty mekaanisen massan eri jakeista, katkeamispituus ja puhkaisulujuus kasvoivat, kun kuitupituus pieneni. Tosin keskimääräinen kuidun halkaisija samalla pieneni lyhyemmissä jakeissa. Clark /7,8,9/ on tehnyt kokeita synteettisillä kuiduilla, joiden pituus vaihteli, mutta halkaisija pysyi vakiona, ja huomannut, että kuitupituuden kasvaessa myös kaikki lujuusominaisuudet paranevat.



Kuva 1. Repäisylujuuden riippuvuus pitkäkuituosuudesta /1/.

Brechtin ja Klemmin /10/ työn tulokset näyttävät mekaanisen massan kuidunpituusjakauman tärkeyden, kun määritetään märkälujuuutta.

Kokeissa testettiin märkiä arkkeja, jotka sisälsivät erilaisia osuuksia "kuituja" (R130 jae) ja "hienoainetta" (P130 jae). Kokeet osoittivat, että maksimimärkälujuus saavutettiin arkeilla, jotka sisälsivät noin yhtäsuuren paino-osuuden kuituja ja hienoainetta.

Myös mekaanisen massan komponenttien partikkelien muodolla on tärkeä merkitys paperin lujuusominaisuuksiin. Hiokemassa, jolla on hyvät lujuusominaisuudet, sisältää tahmeaa tai limamaista hienoainetta (kuituplasmaa tai lima-ainesta) kun taas hiokemassa, jolla on huonommat lujuusominaisuudet, sisältää jyvämäistä hienoainetta (jauhoaines) /11/.

Brecht ja Schanz /12/ ovat eritelleet kuituplasmaa ja jauhoainesta pinta-alamittausten avulla. Selvisi, että massalla, joka tehtiin terävällä kivellä matalassa hiontapaineessa ja joka ilmeisesti sisälsi kuituplasmaa, oli suurempi ominaispinta kuin massalla, joka oli tehty tylsällä hiomakivellä korkeassa paineessa ja joka todennäköisesti sisälsi jauhoainesta.

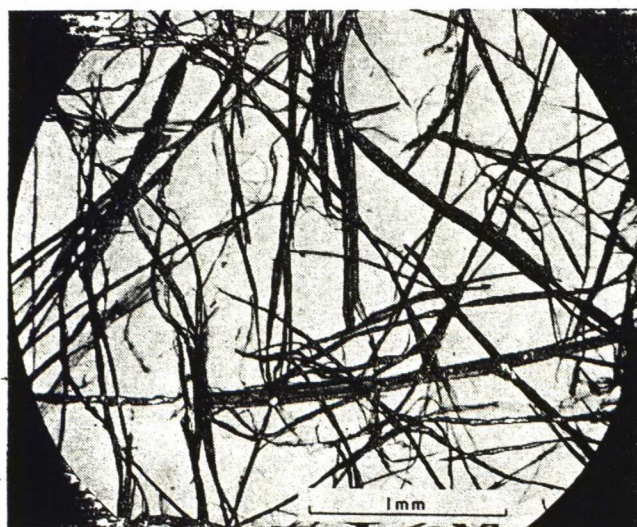
Brecht ja Klemm /10/ sekä Brecht ja Erfurt /13/ ovat kiinnittäneet huomiota rakenteelliseen riippuvuuteen pitkien kuitujen ja hienoaineen välillä: pitkät ja ohuet kuidut liittyvät kuituplasmaan, kun taas paksut ja möhkälemäiset kappaleet ovat yhteydessä jauhoainekseen. Näinollen tarkastelemalla visuaalisesti suhteellisen suuria massapartikkeleita voidaan muodostaa karkea käsitys mekaanisen massan lujuudesta, vaikka tarkasteltavat partikkelit edustavat vain osaa koko massasta. Sen vuoksi voidaan sanoa, että suurten partikkelien muoto on luonteenomainen koko massan ominaisuus, joka koskee myös hienoainesta.

Nämä e.m. kohdat voidaan tiivistää kolmeen tärkeään kohtaan:

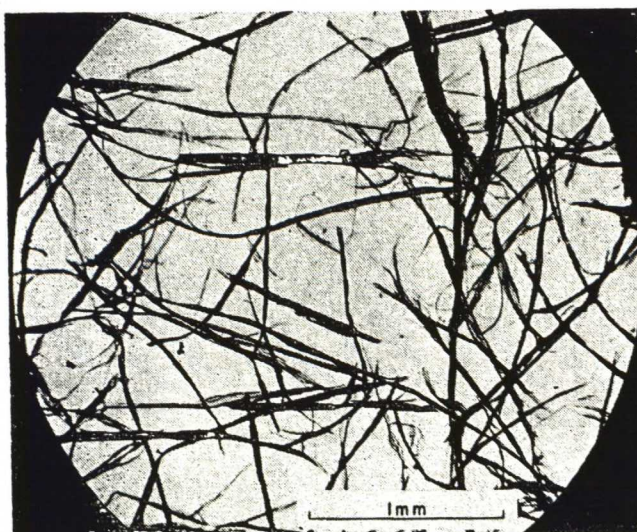
1. Perinteiset mittaukset, joita käytetään kuvailemaan mekaanisia massoja, liittyvät toisiinsa. Tämän perusteella mekaanisen massan ominaisuudet riippuvat muutamasta massan perusparametrasta.
2. Keskimääräinen kuitupituus, kuitupituusjakauma ja mekaanisen massan partikkelien muodot sekä sitoutumispotentiaali ovat tekijöitä, jotka vaikuttavat mekaanisesta massasta tehtyjen arkkien lujuusominaisuuksiin.
3. Mekaanisen massan pitkäkuitujakeen rakenne liittyy läheisesti hienoainerakenteeseen.

3.1 Mekaanisten massojen yleiskuvaus

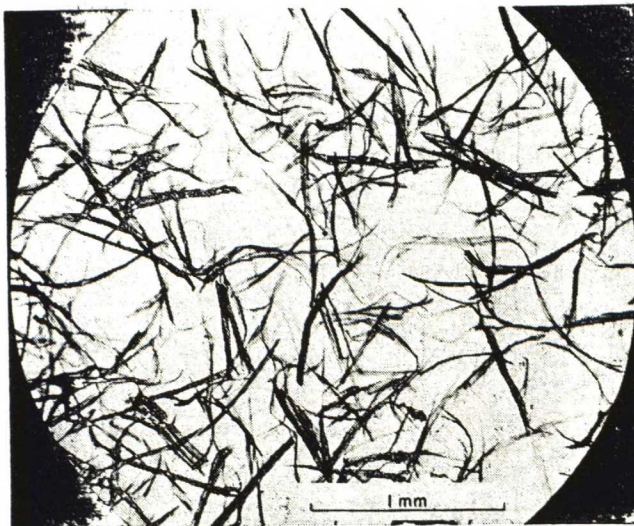
Mekaaninen massa sisältää lähes äärettömän määrän erimuotoisia ja -kokoisia partikkeleja, minkä vuoksi mikroskooppinen koko massan luonnehtiminen on hankalaa ilman sopivia tyyppiluokkia. Mekaanisia massoja voidaan helposti tutkia ja kuvailla fraktioimalla näytteet Bauer-McNett-lajittimella, minkä jälkeen eri pituusjakeita voidaan tutkia erikseen. Kuvissa 2,3,4 ja 5 on esitetty valokuvat R28, 28/48, 48/100 ja 100/200 jakeista /1/.



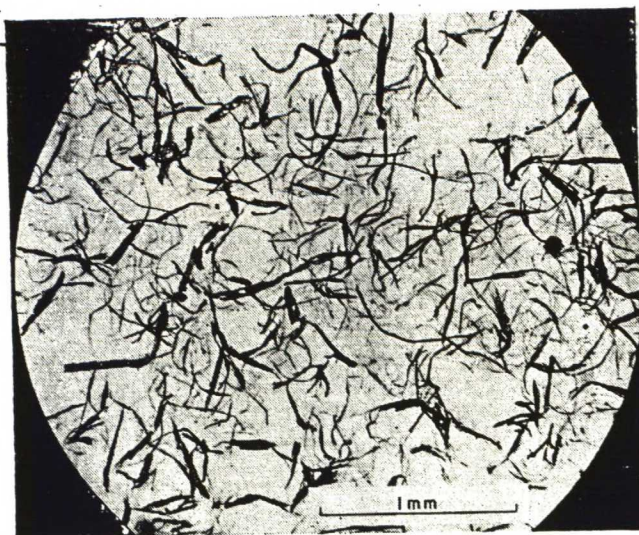
Kuva 2. Mekaanisen massan R28 jae /1/.



Kuva 3. Mekaanisen massan 28/48 jae /1/.



Kuva 4. Mekaanisen massan 48/100 jae /1/.



Kuva 5. Mekaanisen massan 100/200 jae /1/.

R28 jae koostuu kuiduista, joiden keskimääräinen pituus on noin 2 mm. Jotkut partikkelit ovat hyvin erottuneita trakeideja, minkä lisäksi jae sisältää kahden tai kolmen trakeidin kimppuja sekä pitkiä trakeidien osasia. Jakeessa esiintyy vain hyvin vähän fibrillaatiota /1/.

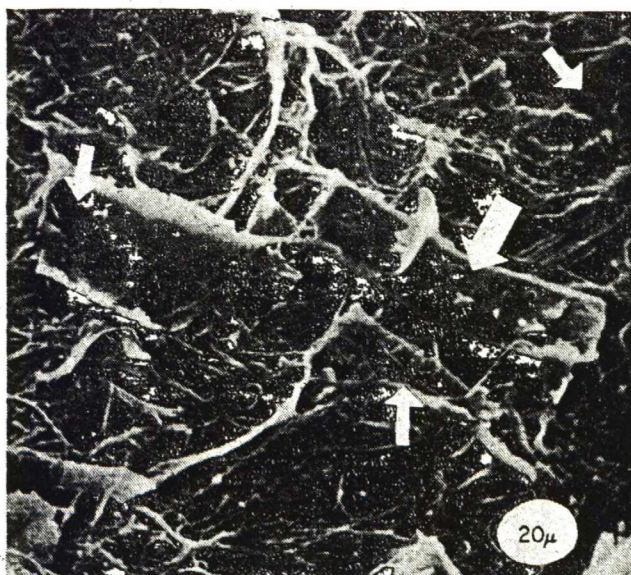
28/48 jakeen kuitujen keskimääräinen pituus on noin 1 mm, mutta muuten kuituaines muistuttaa R28 jaetta. Myös 28/48 jakeessa on vain vähän fibrillaatiota. Kuitenkin osa partikkeleista on suhteellisen läpinäkyviä, mikä osoittaa niiden olevan soluseinän kalvoja tai trakeidien osasia, joissa lumen on paljastunut siten, että valo paistaa vain yhden soluseinän läpi /1/.

48/100 jae sisältää kappaleita, jotka ovat säilyttäneet trakeidien putkimaisen muodon, mutta myös huomattavan paljon nauhamaisia kappaleita tai kalvoja sekä jonkun verran hienoa fibrilloitunutta ainesta. Partikkelien keskimääräinen pituus on noin 0,6 mm /1/.

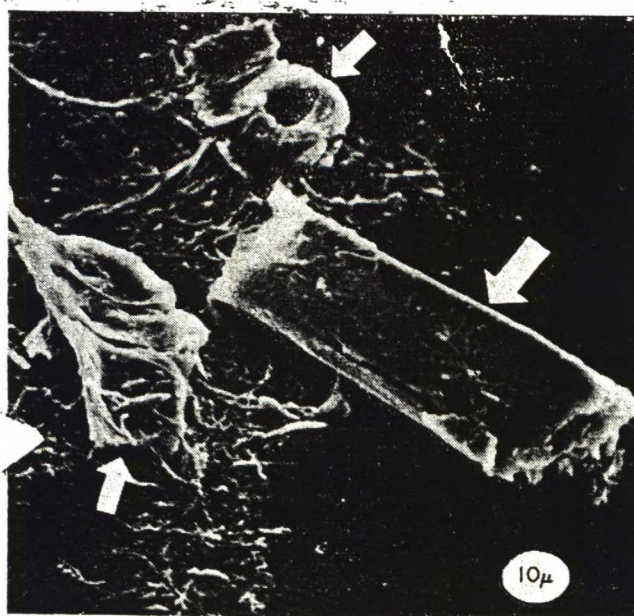
100/200 jae sisältää vain vähän partikkeleita, joiden lumen on koskematon. Suuri osa jakeesta koostuu kuitenkin soluseinän ohuesta lamellista yhdessä verrattaen suuren määrän pitkiä fibrillilankoja kanssa. Keskimääräinen partikkelipituus on noin 0,3 mm /1/.

Kuvassa 6 on tyypillinen näkymä P200 jakeesta. Mikroskoopin avulla voidaan erottaa viisi toisistaan selvästi erottuvaa tyyppiluokkaa:

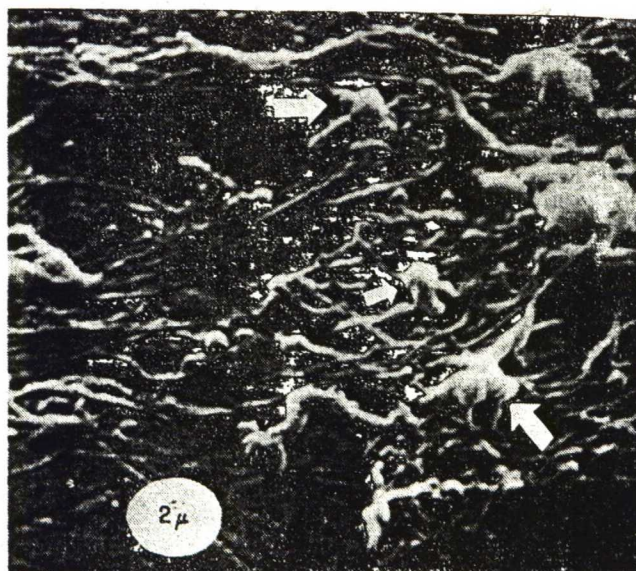
1. Pienet kuidun palaset (kuva 6).
2. Sädesolut (kuvat 6 ja 7 (iso nuoli)).
3. Erilliset tai osittain erottuneet huokoset (kuva 7 (pieni nuoli)).
4. Pienet kappaleet, halkaisija tavallisesti $< 1 \mu\text{m}$. Ilmeisesti ligniinikappaleita tai hyvin ligniinipitoisia keskilamellin palasia (kuva 8).
5. Fibrilloitunut aines (kuva 9).



Kuva 6. Näkymä P200 jakeesta /1/.



Kuva 7. Sädesoluja ja huokosia /1/.



Kuva 8. Ligniiniipitoista keskilamellia /1/.

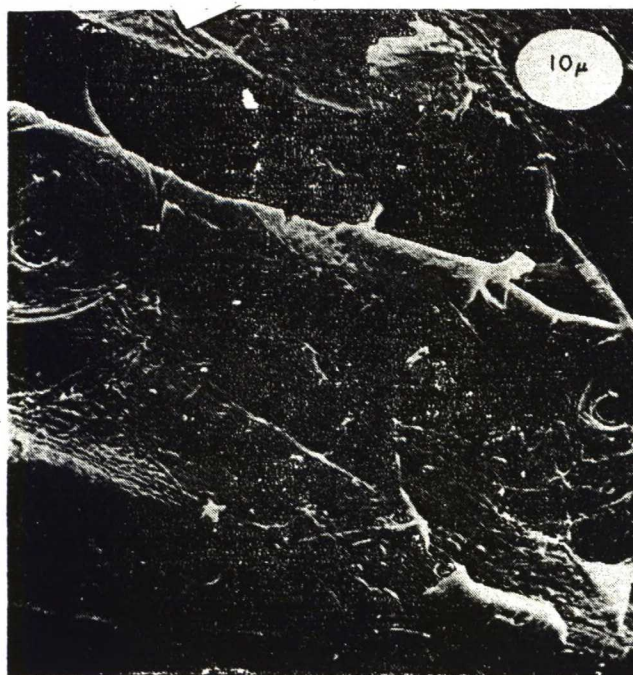


Kuva 9. Fibrilloitunutta materiaalia /1/.

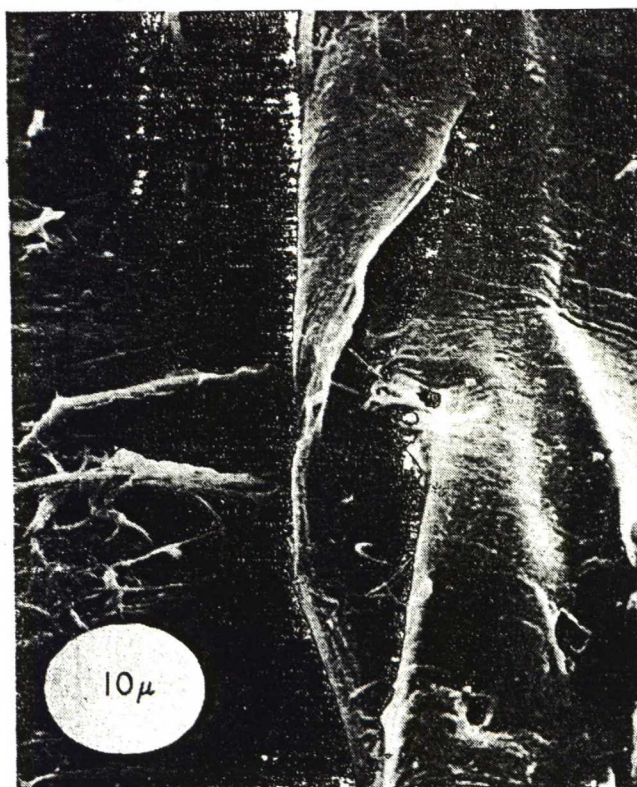
3.2 Pitkien kuitujen pinta

Mekaanisen massan R28 jae koostuu suurelta osin kuiduista ja kuitukimpuista, joiden pituudet ovat samanlaisia kuin trakeidin.

Kuva 10 ei osoita minkäänlaista fibrilloitumiskuviota kuidun pinnalla, minkä perusteella k.o. kuidut olisivat irtautuneet jostain keskilamellin kohdalta. Ainakaan soluseinän pinnat eivät paljasta mitään repeämistasoa, jota pitkin kuidut olisivat irronneet. Hierremehetelmällä tehty mekaaninen massa sisältää huomattavasti enemmän ehjiä kuituja kuin kivihioke. Lisäksi ehjissä kuiduissa, sekä hierteessä että hiokkeessa, on usein S_2 :n kierreviivaa noudattavia halkeamia tai murtumia soluseinässä (kuva 11) /1/.



Kuva 10. Hyvin erottuneen kuidun pinta /1/.



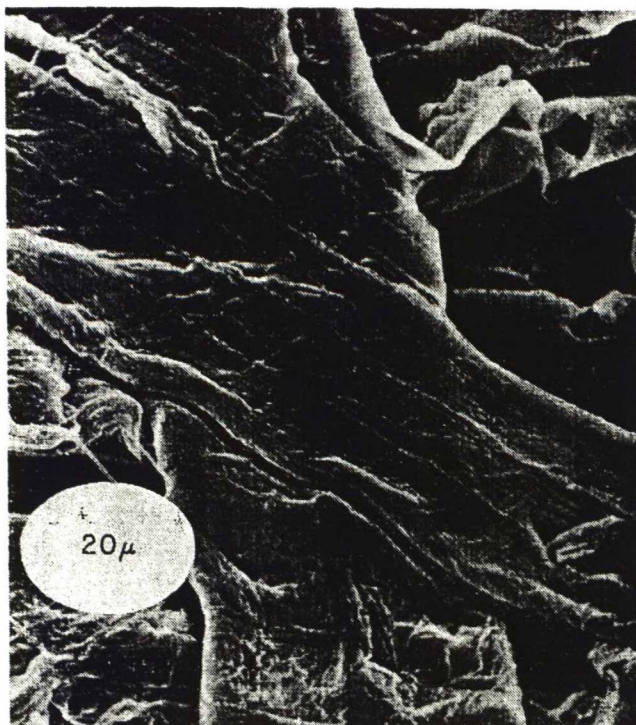
Kuva 11. Halkeamia soluseinässä /1/.

3.3 Mekaanisen massan kuituverkoston koossapysyvyys

Kuvassa 12 on kahden kuidun risteyskohta, joka on tyypillinen sanomalehtiarkin pinnalla. Kuvasta käy ilmi, että mekaanisen massan kuidut ovat jäykkiä, eivät luhistu kuivattaessa kuten kemiallisen massan kevätpuukuidut eivätkä mukaudu toisiinsa paperissa. Kuitujen jäykkyys yhdessä niiden epäsäännöllisten muotojen kanssa on tärkeää, koska siten kahden kuidun välisen kosketuspinnan kuituverkostossa täytyy olla pieni. Samalla myös tällaisten kuitujen välinen sidosten muodostukseen sopivan pinnan täytyy olla pieni /1/.



Kuva 12. Mekaanisen massankuitujen risteyskohta /1/.



Kuva 13. Sulfiittikuitujen risteyskohta /1/.

Kuvassa 13 on kahden sulfiittikuidun risteyskohta sanomalehtiarkin pinnalla. Kemiallisen massan kuidut ovat luhistuneet nauhoiksi ja mukautuneet täydellisesti toisiinsa, mikä saa aikaan suuren kosketuspinnan.

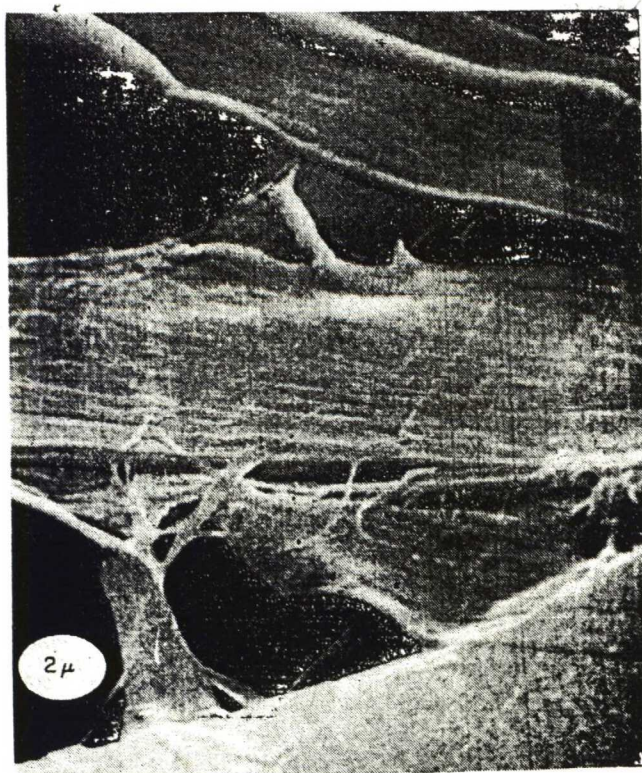
Alhainen mekaanisen massan sidospotentiaali näkyy pitkäkuitujakeesta tehtyjen arkkien vetolujuudessa. Taulukossa 1 on esitetty hiokkeen eri jakeiden ja sulfaattimassan R28 jakeen katkeamispituuden eroja /1/.

Taulukko 1. Eri massojen ja massajakeiden katkeamispituuksia /1/.

<i>Sample</i>	<i>Breaking Length, m.</i>
News-grade groundwood	
Whole pulp	3900
R28 fraction	1100
28/48 fraction	1400
News-grade sulphite	
R28 fraction	8000

Tarkasteltaessa paperin koossapysyvyyttä täytyy tutkia myös pienempiä partikkeleja. Kuvassa 14 on nauhamaisia soluseinän palasia, jollaisia on paljon myös 100/200 jakeessa. Nauhat ovat tiiviisti mukautuneet toisiinsa kuten kuvan 13 kemiallisen massan kuidut. Mekaanisen massan lyhyempien jakeiden nauhat, kalvot ja fibrillit ovat paperin sidosmateriaali. Kuva 15 osoittaa, kuinka irtonaiset fibrillit ovat sitoneet suuren kuidun metalliseen näytealustaan /1/.

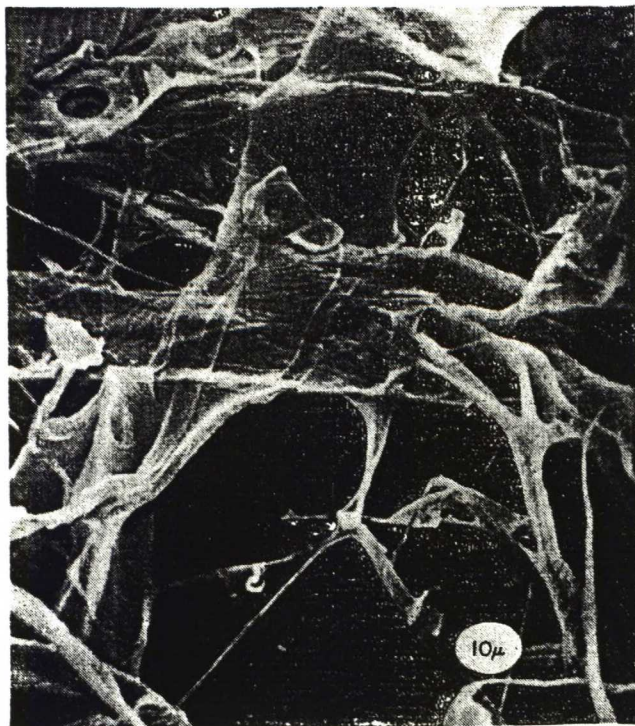
Kuvan 16 suuret nauhat ovat todennäköisesti tehokkaimmat yksittäiset partikkelit, jotka pitävät mekaanisesta massasta tehdyn paperin koossa. Näitä nauhoja on erityisen runsaasti vahvojen hierremassojen 48/100 ja 100/200 jakeissa /1,9/.



Kuva 14. Nauhamaisia soluseinän palasia /1/.



Kuva 15. Fibrilloitunutta sidosmateriaalia /1/.



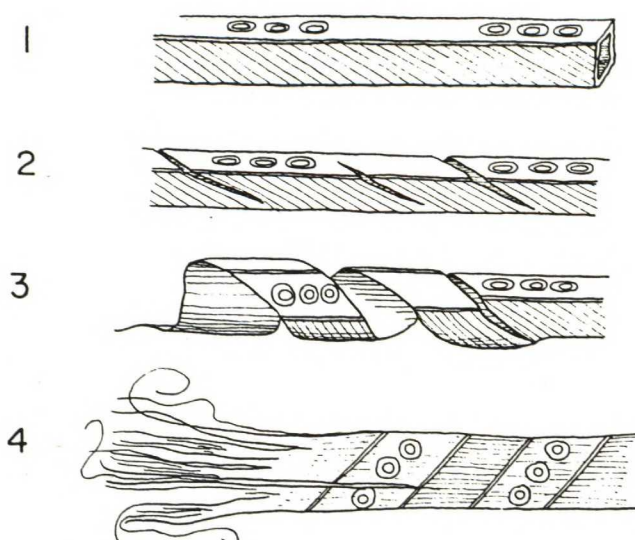
Kuva 16. Suuria nauhoja /1/.

3.4 Nauhamaisten kalvojen muodostuminen

Nauhat muodostuvat pääasiassa soluseinän S_2 -kerroksesta. S_2 -fibrillien suunta on usein rinnakkainen nauhojen pituusakselin kanssa. Kuten kuva 11 osoittaa, yksittäisten pitkien kuitujen pinnassa on S_2 -fibrillien kierreviivan suuntaisia halkeamia. Tämän perusteella nauhat syntyvät halkeamien levitessä pitkin S_2 -kerrosta, mikä johtaa kokonaisen kuidun purkaantumiseen suikaleiksi tai nauhoiksi /1,14/.

Kuvassa 17 on kaavamaisesti esitetty kuidun purkaantuminen. Jos purkaantunut kuitu suoristetaan, se näyttää samalta kuin piirroksessa 4. Entiset solun kulmat näkyvät vinoina viivoina poikki nauhan. Viivojen ja nauhan akselin välinen kulma on sama kuin S_2 :n kierreviivan ja trakeidin pituusakselin välillä.

Kuvassa 17 esitetyt vaiheet löytyvät kaikista mekaanisista massoista /1,14/.



Kuva 17. Kaavamainen piirros kuidun halkeamisesta ja purkaantumisesta nauhoiksi /1/.

Trakeidien S_2 -kerroksen purkaantuminen on tärkeä mekaanisen massan ominaisuus, koska nauhat ja fibrillit, jotka syntyvät purkaantumisen tuloksena, ovat erittäin sopivia sidosten muodostamiseen. Soluseinän rakenteen alkulöystyminen saattaa mekaanisen massan valmistuksessa alkaa jo ennen kuin kuidut saavuttavat puun pinnan (= puun sisäosissa). On kuitenkin vaikea nähdä, kuinka purkaantuminen tapahtuu, koska kuidut ovat vielä puumatriisin sisällä /1/.

Ilmeisesti purkaantumisprosessi on hionnan tai hierron sekundaarivaihe, kun kuidut ovat ensin osittain tai kokonaan erottuneet. Purkaantuminen näyttää liittyvän prosessiin, jossa puuainne on rikottu selvästi erottuviin, kokonaisiin kuituihin. Jos puu on rikottu paksuiksi möhkäleiksi ja kappaleiksi, jotka sisältävät useiden trakeidien palasia, purkaantuminen on ilmeisesti vähäistä, koska kierreviivan suuntaan mitattu tarkoitukseen sopiva S_2 -kerroksen pituus on liian pieni.

Tällaisessa tapauksessa S_2 :n halkeamat eivät lähde leviämään ja syntyy hienoaainetta, jonka sidospotentiaali on pieni.

Tätä johtopäätöstä tukee havainto, jonka mukaan hierremassat, joilla on hyvät lujuusarvot, sisältävät paljon sekä purkautunutta materiaalia että ehjiä, hyvin erottuneita kuituja.

Selitys tälle on Brechtin ja muiden tutkijoiden /10,12,13/ havainto, jonka mukaan parempi hienoaine (kuituplasma) on yhteydessä pitkiin ja kapeisiin kuituihin, kun taas huonompi hienoaine (jauhoaines) esiintyy yhdessä tikkuisen ja möhkälemäisen pitkäkuitujakeen kanssa.

4 MASSAJAKEIDEN VAIKUTUS MASSAN JA PAPERIN OMINAISUUKSIIN

4.1 Massan ominaisuudet

Eri jakeet vaikuttavat massan ja paperin ominaisuuksiin eri tavoin. Lisättäessä massaan:

- R28 jaetta → massan freeness kasvaa
- R48 jaetta → massan freeness kasvaa
- R100 jaetta → massan freeness kasvaa
- R200 jaetta → ei vaikutusta freenessiin
- P200 jaetta → massan freeness laskee /15,16/.

20 %:n kuiva-ainepitoisuudessa mitattu alkuperäismärkälujuus nousee pitkiä kuituja lisättäessä, pysyy muuttumattomana R100 jaetta lisättäessä ja nousee lisättäessä R200 ja varsinkin P200 jaetta. Korkeimmat alkuperäismärkälujuusarvot saadaan lisäämällä sekä pitkiä että lyhyitä kuituja /15,16/.

Hienoaineen poistaminen lisää bulkkia ja vastaavasti lisääminen alentaa bulkkia. R48 ja R28 jakeiden lisäyksellä saavutetaan suurimmat bulkin arvojen nousut /16/.

Hienoksi hiotun massan pitkäkuituisuus antaa lisättäessä paremman alkuperäismärkälujuuden kuin karkeamman massan vastaava jae, vaikka molempien kuitupituus olisi sama.

Alkuperäismärkälujuus tietyllä freenessstasolla paranee, kun massan kuidunkeskipituutta lisätään joko kuitujakeita lisäämällä tai hienoaainetta poistamalla /15/.

4.2 Paperin lujuusominaisuudet

Suurimmat lujuusarvot saavutetaan massalla, johon on lisätty sekä R28 että P200 jakeita, eli ts. massalla, jonka keskijae on pieni.

R200 jakeen lisääminen vaikuttaa vähiten massan keskimääräiseen lujuuteen, vaikka tämä jae on epäedullinen vetolujuuden kannalta. R48 jakeen lisäyksellä saavutetaan paras repäisylujuus /17/.

Arkin vetolujuuden ja massan S-arvon eli R100 jakeen ominaissuotautumisvastuksen välillä on yleensä selvä riippuvuus. Massan freeness korreloi arkin vetolujuuden kanssa ainoastaan kuusi-PGW ja mänty-PGW -aineistoissa /18/.

Arkin repäisylujuuden ja BMcN-kuitulajittelun R28 jakeen välillä on yleensä voimakas riippuvuus. Hyvä korrelaatio perustuu osittain muuttujien suureen vaihteluväliin /18/.

Freeness indikoi arkin tai paperin ominaisuuksien muutoksia repäisylujuutta lukuunottamatta silloin, kun puuraaka-aine ja prosessin olot ovat likimain vakiot /18/.

4.3 Fibrillaatio ja yksittäiskuitujen sitoutumispotentiaali

Kuidun sisäinen fibrillaatio tarkoittaa kuituun kohdistuvan rasituksen aiheuttamaa kuidun sisäisen rakenteen löystymistä. Kuidun sisäkerrosten väliset vetysidokset murtuvat ja kuitu turpoaa, jonka seurauksena kuidun taipuisuus lisääntyy. Kuidut mukautuvat sidostenmuodostumisvaiheessa helposti toisiinsa ja kuitujen väliset kosketuspinnat tulevat suuriksi ja sidosten syntymisedellytykset paranevat /19/.

Ulkoisella fibrillaatiolla tarkoitetaan kuidun pintakerroksen rakenteen särkymistä.

Mikrofibrillikimput irtoavat osittain kuidun pinnasta, jolloin kuidun pinta muuttuu karvamaiseksi. Kuidun ulkoinen pinta suurenee ja sidostenmuodostumisvaiheessa fibrillit ankkuroituvat helposti toisiinsa muodostaen edellytykset tiheään vetysidosverkoston muodostamiselle /19/.

Yksittäiskuitujen sitoutumispotentiaalilla ei tarkoiteta mitään yksittäistä kuituominaisuutta, vaan kaikkia niitä riippumattomia kuituominaisuuksia, jotka vaikuttavat merkitsevästi paperiarkin sidoksiin. Sitoutumispotentiaali voidaan siis katsoa kuituominaisuudeksi, jonka osina ovat (toisistaan riippumattomat) perusominaisuudet, kuten kuidun jäykkyys, paksuus, fibrilloitumisaste ja kokoonpuristuvuus /20/.

Yksittäiskuitujen sitoutumispotentiaali on määritettävä geometrisiltä päädimensioiltaan samanlaisista kuiduista, koska sitoutumispotentiaalin arvo ei muuten olisi riippumaton suureista, jotka luonnehtivat hioketta seoksena /20/.

Mekaanisista massoista kuumahierteellä vetolujuus nousee jyrkästi aivan pieniin kuidunpituuksiin mentäessä, mikä viittaa kuumahierteen hienoaineen hyvään sitoutumiskykyyn. Toinen merkittävä seikka on kuumahierteen pitkien kuitujen alhainen sitoutuneisuus: verrattaessa alkuperäismassan ja sen eri jakeiden repäisylujuutta, voidaan havaita, että kaikkien jakeiden repäisylujuus on alhaisempi kuin alkuperäismassan repäisylujuus. Tämä piirre osoittaa myös hienoaineen ratkaisevan merkityksen pitkien kuitujen toisiinsa sitojana /21/.

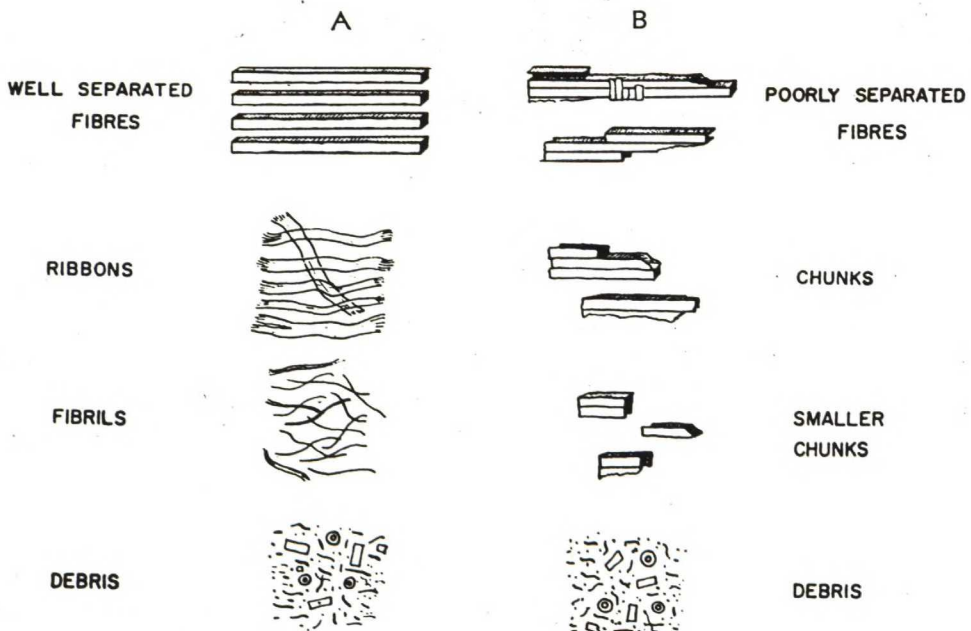
5 MEKAANISTEN MASSOJEN RAKENTEELLISEN KOOSTUMUKSEN KVANTITATIIVINEN ARVIOINTI

Erilaiset mekaaniset massat sisältävät erilaisia määriä nauhamaisia ja möhkälemäisiä osasia ja ilmeisesti näiden kahden materiaalityypin suhteellisten osuuksien mittaus pitäisi heijastaa erilaisten massojen kuitujen välistä sidospotentiaalia /22/. Näinollen mekaanisen massan rakenteellista koostumusta voisi kuvata kahdella tekijällä:

1. Kuitupituuden massajakauma
2. Hiukkasmuototekijä, joka kuvaasi nauhamaisen ja möhkälemäisen materiaalin suhteellisia osuuksia /22/.

5.1 Muototekijämittaus

Kuvassa 18 on kaavamaisesti esitetty kaksi mekaanista massaa, A ja B, joista A edustaa massaa, jolla on suuri sidostenmuodostuspotentiaali, ja B massaa, jolla on pieni sidostenmuodostuspotentiaali. Brechtin terminologiassa A edustaa massaa, joka sisältää lima-ainesta, ja B massaa, joka sisältää jauhoainesta /1/.



Kuva 18. Kaksi erilaista mekaanista massaa, A ja B /1/.

Suurimmat erot massojen A ja B välillä on keskijakeissa. Jos erilaisten massojen keskijakeista saadaan näytteet, joissa partikkeleilla on samat pituudet tai ainakin samanlaiset pituusjakaumat, pitäisi nauhoja sisältävällä jakeella olla suurempi ulkoinen pinta-ala massayksikköä kohti kuin paksuja möhkäleitä sisältävällä jakeella. Ominaispintamittaus voi toimia muototekijänä, joka puolestaan voi olla koko massan, josta jae on otettu, sidospotentiaalin indeksi /1/.

Näitä tarkentavat seuraavat kokeelliset vaatimukset:

1. Jakeiden, joilla on yhtäläiset kuitupituudet tai kuitupituusjakaumat, eristäminen erilaisista mekaanisista massoista.
2. Ulkoisen ominaispinnan mittaaminen e.m. jakeista.
3. Näiden jakeiden ominaispintojen vertaaminen toisiinsa sekä ominaispintojen ja arkkien ominaisuuksien välisten riippuvuuksien selvittäminen /1/.

5.2 Massan sitotutumiskyvyn määrittämenetelmiä

Paperi on selluloosaperustaisista kuiduista koostuva ohut ja tasomainen heterogeeninen rakenne. Kuidut ovat sitoutuneet toisiinsa ja muodostavat siten kuormitusta kantavan rakenteen. Kuitujen ominaisuudet vaikuttavat syntyvien sidosten määrään ja laatuun. Kuitujen sitoutumiskykyä voidaan arvioida kuitujen sitoutuneen pinnan alalla ja ominaissidoslujuudella eli sidoksen lujuudella sitoutunutta pinta-alayksikköä kohden /19/.

5.3 Ominaispintamittaus

Kuitumateriaalien ominaispinnan vertailuun on kehitetty useita menetelmiä. Tärkeimpiä niistä ovat pintakatalyyttimenetelmä, optiset menetelmät ja nesteen läpäisevyysmenetelmä. Paperinvalmistuksessa kuituverkoston sidokset syntyvät kutakuinkin samassa kiintoainepitoisuudessa kuin kutistuminen alkaa. Tämän perusteella pinta, joka voi muodostaa sidoksia, liittyy paremminkin turvonneeseen ainekseen kuin kuivuneeseen. Sen vuoksi tavallisesti mitataan vedessä turvonneiden kuitujen ominaispintaa. Tutkimusten mukaan ominaistilavuus on yksi ainakin kemiallisen massan kuiduista valmistetun paperin ominaisuuksiin vaikuttavista tekijöistä. Cowan /23/ on määrittänyt kuitumaton ominaispinta-alan veden permeabiliteetista massakakun läpi soveltaen Kozeny-Carmanin yhtälöä /19/.

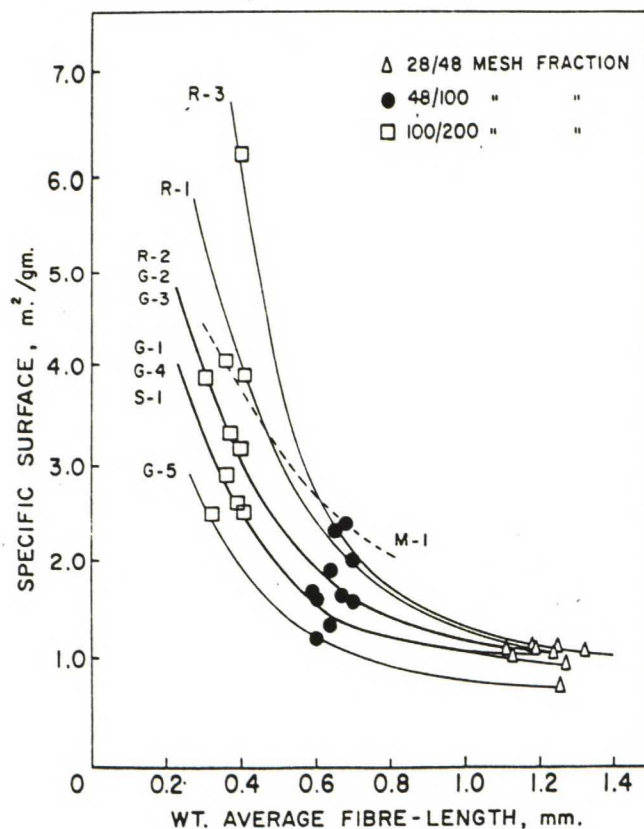
Läpäisevyysmenetelmällä määritetään hydrodynaamista ominaistilavuutta (cm^3/g) ja ominaispintaa (cm^2/g). Menetelmä perustuu kuitutyynyn vedenläpäisevyysmittauksiin hydrostaattisten päiden, joilla aikaansaadaan hidas virtaus massakakun läpi, välillä.

Kun tunnetaan massakakun dimensiot, hydrostaattinen korkeus, virtausaste ja veden viskositeetti, Darcyn vakio K (cm^2) voidaan määrittää. Konsentraatio c (g/cm^3) lasketaan määrän massakakun dimensioista ja massakakun kuivapainosta. Ominaispinta σ ja ominaistilavuus α voidaan laskea K :n avulla Kozeny-Carman-yhtälöllä

$$(Kc^2)^{1/3} = (1/(5,55\sigma^2))^{1/3} * (1-\alpha c) \quad (1)$$

Määrän massan ominaispinnasta voidaan tehdä arvioita myös sedimentoitumisnopeuden (settling rate) avulla /24/.

Useimmat ulkoisen pinta-alan mittaamenetelmät eivät pysty erottamaan kuidun ulkoista pintaa kuidun sisäisestä pinnasta, jolloin mm. lumenin sitoutuminen aiheuttaa virhettä. Sidosten pinta-alan mittaamenetelminä valonsirontakerroin- ja typpiadsorptiomenetelmä ovat soveltuvimmat /19,25,26,27,28,29,30,31/.

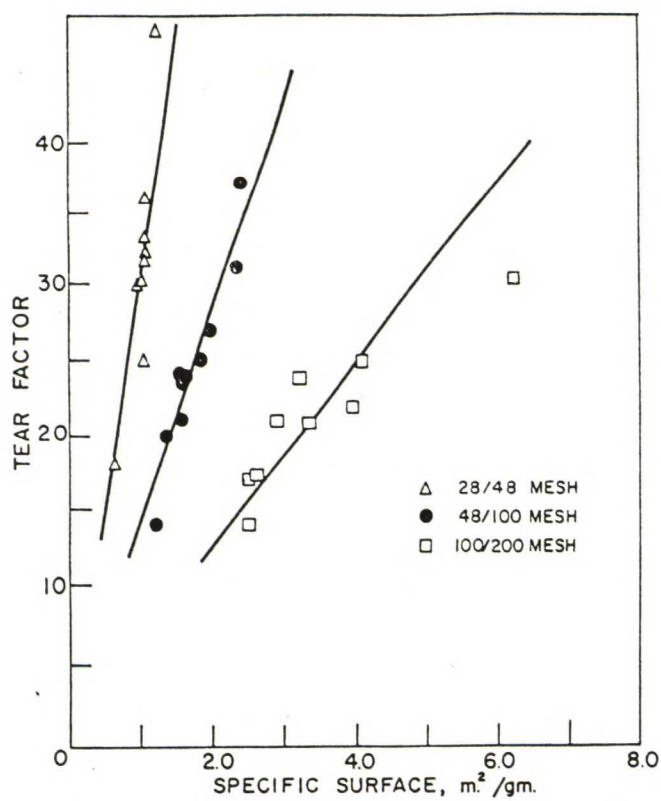


Kuva 19. 28/48, 48/100 ja 100/200 jakeiden ominaispinnat painotetun keskimääräisen kuitupituuden funktiona /1/.

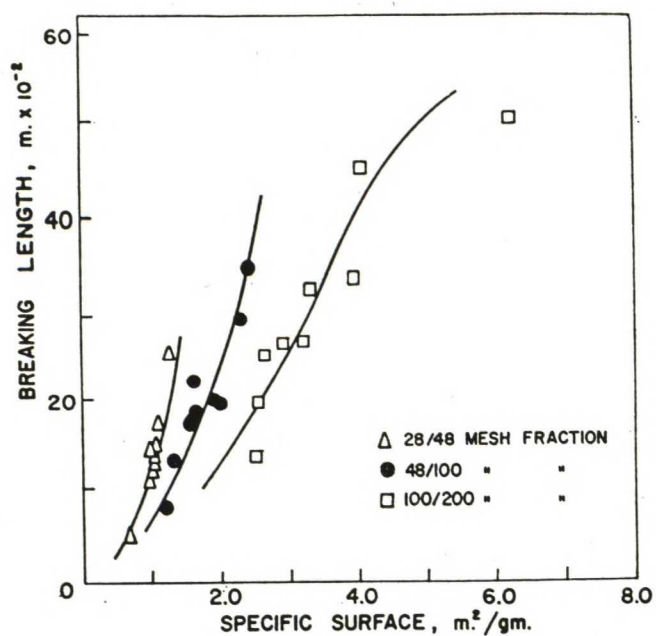
Kuvan 19 tulokset voidaan selittää kuvan 18 avulla. Massat, joiden 48/100 ja 100/200 jakeilla on suuri ominaispinta, sisältävät todennäköisesti paljon nauhoja ja fibrillejä, ja massat, joilla on alhainen ominaispinta, sisältävät vastaavasti paljon möhkälemäistä ainesta. Nauhamainen fibrilloitunut soluseinäaaines, jossa partikkelit ovat hyvin mukautuvaisia, muodostavat mekaanisesta massasta tehdyn paperin pääsidosaineen /1,25,26,27,28/.

6 MASSAJAKEIDEN OMINAISPINNAN JA ARKKIEN OMINAISUUKSIEN VÄLINEN RIIPPUVUUS

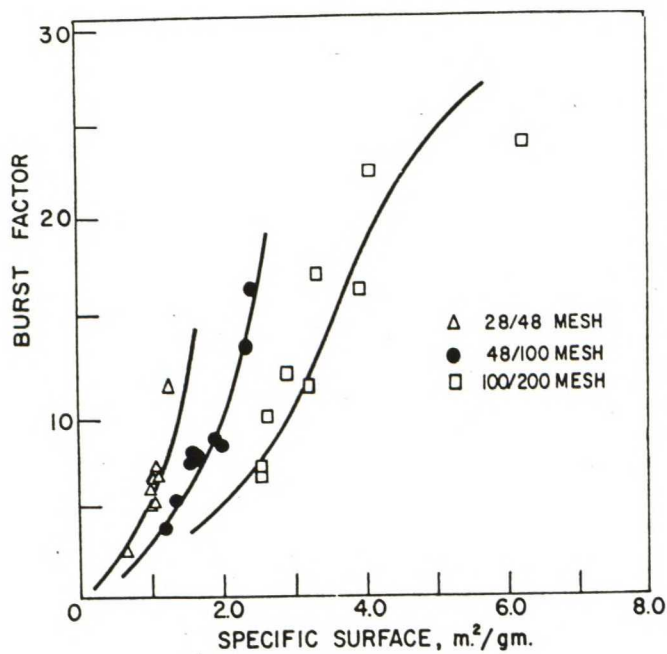
Kuvassa 20 on esitetty kolmen eri jakeen repäisyindeksi ominaispinnan funktiona. Kuva osoittaa, että keskimääräisen kuitupituuden pysyessä vakiona repäisyindeksi kasvaa σ :n kasvaessa. Myös suurempi keskimääräinen kuitupituus saa aikaan paremman repäisyindeksin. Kuva 21 osoittaa puolestaan, että katkeamispituus kasvaa sekä σ :n kasvaessa, kun kuitupituus pysyy vakiona, että kuitupituuden kasvaessa, kun σ pysyy vakiona. Puhkaisuindeksi käyttäytyy samalla tavalla kuin katkeamispituus (kuva 22). Arkin bulkki pienenee ominaispinnan kasvaessa (kuva 23). Kuitupituudella ei näytä olevan paljonkaan vaikutusta bulkkiin /1/.



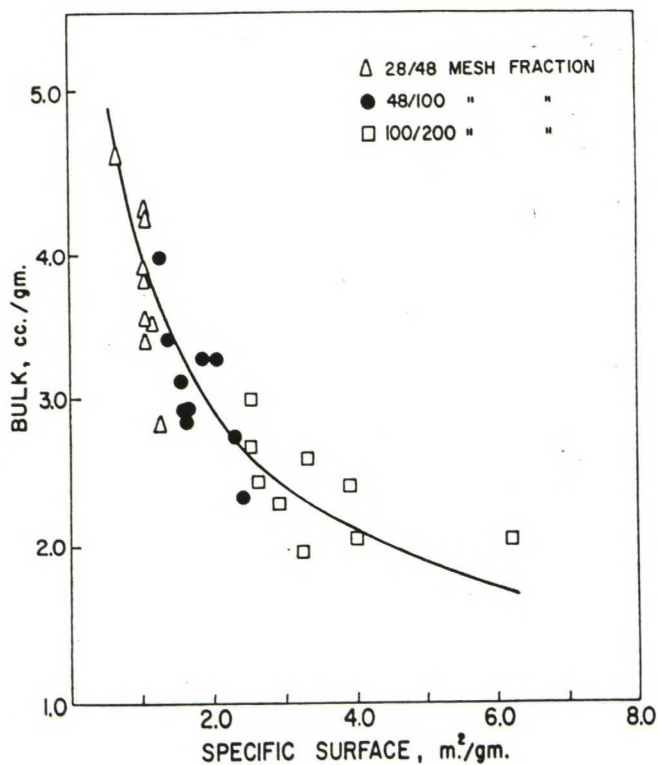
Kuva 20. Keskipakojen repäisyindeksi ominaispinnan funktiona /1/.



Kuva 21. Ominaispinnan vaikutus katkeamispiteuteen /1/.



Kuva 22. Ominaispinnan vaikutus puhkaisuindeksiin /1/.



Kuva 23. Ominaispinnan vaikutus bulkkiin /1/.

7 MEKAANISEN MASSAN KARAKTERISOINTI RAKENTEELLISEN KOOSTUMUKSEN PARAMETREILLA

Mekaanisen massan rakenteellinen koostumus voidaan määritellä kuitupituuden painojakaumalla ja muototekijällä, joka kuvaa nauhamaisten ja möhkälemäisten ainesten suhteellisia osuuksia.

7.1 Forgacsin karakterisointiparametrit

7.1.1 Muototekijä

Muototekijä voidaan johtaa kuvan 19 käyrien suhteellisesta tasosta. Kuva 19 osoittaa, että käyrien suhteellinen taso voidaan määrittää kohtuullisella tarkkuudella 48/100 jakeen ominaispinnan avulla.

Siten jokaiselle massalle on määritettävissä yksi karakteristinen luku, joka liittyy partikkelien muotoon ja joka riippuu alkuperäisen massan kuitupituusjakaumasta /1/.

48/100 jakeen ominaispinta määritellään muototekijäksi, jonka symboli on S.

7.1.2 Kuitupituusjakauma

On mahdollista määrittää jokaisen massan kuitupituuden painokeskiarvo R48 jakeen (oikeastaan R28 ja 28/48 jakeiden) prosenttiosuuden avulla.

Mekaanisilla massoilla, joilla on samanlaiset R48 jakeet, on aina lähes samanlaiset kuitupituusjakaumakäyrät. Tämä viittaa siihen, että R48 jae antaa yhden luvun, joka määritellään sekä massan kuitupituuden painokeskiarvoksi että sen kuitupituusjakauman käyräksi /1/.

R48 jae määritellään pituustekijäksi, jonka symboli on L.

7.2 Mannströmin parametrit

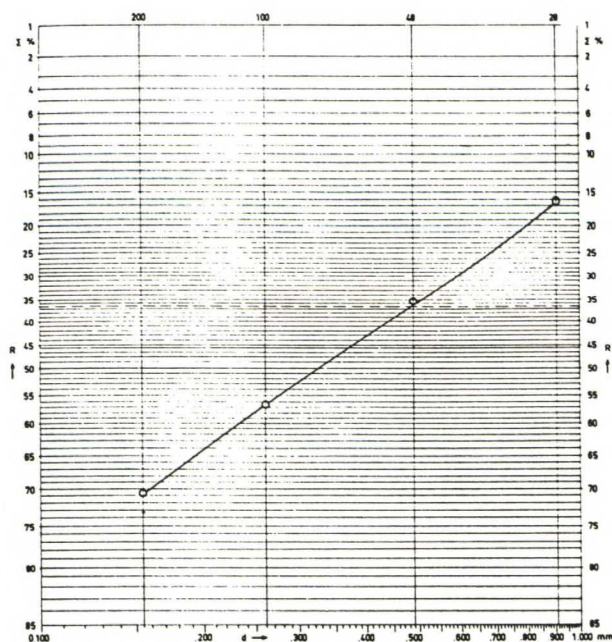
Tehdasmittaisen hiontakokeen yhteydessä suoritettut kokeet, joissa käytettiin suureita S ja L ainoina käytöntarkkailusuureina, osoittivat saatujen tulosten olevan paljon arvokkaampia kuin vastaavat freenessmääritykset. Analysoitaessa riippumattomien massakarakteristikoiden ja eri massa- ja paperitekniesten ominaisuuksien yhteyksiä saatiin aikaisempien kanssa hyvin yhtäpitäviä tuloksia /32/.

Mekaaninen massa on eripituisten kuitujen seos, ja jos tarkastellaan kuitupituusjakaumaa, voidaan huomata, että se on lähes normaalijakautunut. Näinollen kuidun keskipituus on massaseoksen ominainen suure. Kuitenkin normaalijakautunut käyrä voi enemmän tai vähemmän hajota riippumatta keskimääräisestä arvosta. Mekaanisen massan kohdalla tämä viittaa siihen, että kahden eri massan kuitupituusjakaumat voivat olla erilaisia, vaikka niillä olisikin sama kuidun keskipituus /32/.

Yhdellä massalla, joka sisältää paljon karkeaa ja hienoa jaetta, voi olla sama kuidun keskipituus kuin toisella massalla, joka sisältää enemmän keskijaetta ja vähemmän karkeaa ja hienoa jaetta, joten mekaanisen massan kuidunpituusjakauman pitäisi olla riippumaton ja huomioonotettava ominaisuus /32/.

Kuidunpituusjakauma saadaan aikaan, jos fraktioinnin tulosten arviointiin käytetään (raekokoverkko) luokitteludiagrammia (Körnungsnetz). Tämän diagrammin kehitti alunperin Rosin-Rammel hiilen sihtaustulosten arviointiin, ja edelleen sitä kehitti Weibull. Mekaanisen massan karakterisointiin diagrammin sovelsi Ullman /32,34/.

Diagrammi on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. Körnungsnetz-diagrammi /21,32/.

Jos fraktioinnin tulokset sijoitetaan diagrammiin, muodostuu suora viiva; kuidun keskipituus määrää suoran paikan korkeussuunnassa ja suoran kulmakerroin edustaa kuidunpituusjakauman leveyttä. Diagrammin avulla voidaan määrittää kuidun keskipituus \bar{d} ja parametri n , joka on kuitupituusjakauma. Kuidun keskipituus voidaan lukea suoran ja 50 %:n viivan leikkauspisteestä.

Regressioanalyysin avulla voidaan selvittää, millaisia riippuvuussuhteita näiden kolmen parametrin, S , d ja n , ja erilaisten massaominaisuuksien välillä on /32/.

7.2.1 Sitoutumispotentiaalin määrittäminen

Tehtyjen kokeiden mukaan vetolujuus kuvaa parhaiten kuitujen välisten sidosten lukumäärää arkissa.

Näin ollen ominaissuotautumisvastus, jonka lyhenteenä Mannström käyttää S :ää (Forgacsin S on ominaispinnan lyhenne), voisi toimia hyvin sitoutumispotentiaalin mittana, koska ominaissuotautumisvastuksen ja vetolujuuden välillä on vahva korrelaatio.

Forgacs /1/ on käyttänyt sitoutumispotentiaalimäärittäykseen 48/100 jakeita, koska se sisältää purkaantuneita kuituja, mikä vaikuttaa paljolti arkin lujuusominaisuuksiin. Mannström vahvistaa 48/100 jakeen sopivuuden ominaissuotautumisvastuksen mitaksi: R28 ja 28/48 jakeita ei voi käyttää, koska eri massojen ko. jakeiden väliset erot ovat yleensä niin pieniä, että tuloksiin vaikuttaisi toistettavuuden heikkous. Eri massojen 100/200 jakeiden erot ovat suuria, mutta tässäkin tapauksessa ominaissuotautumisvastusmäärittäyksen toistettavuus vaikuttaa haitallisesti /20/.

Frazerin mukaan Bauer-McNett-lajittelun 48/100 jakeen ominaispinta-ala riippuu pääasiassa jakeen kuitujen koosta eikä niinkään kuitujen muoto-ominaisuuksista. Korrelaation puuttuminen tietyn massalaadun (riippuu ominaispinta-alasta) ja puhkaisulujuuden (riippuu kuitujen muodosta) välillä viittaa lajitteluolosuhteiden epäonnistumiseen, jolloin ei saada vertailtavia 48/100 jakeen kuidunpituusjakaumia kaikille näytteille /33/.

Toiset samantyyppiset suotautumistestit ovat samalla tavalla rajoittuneita eikä mikään näistä testeistä ole sopiva hiokkeen puhkaisulujuuden laadunvalvontaan /33/.

7.2.2 S:n, d:n ja n:n sekä eri massaominaisuuksien väliset riippuvuussuhteet

Sitoutumispotentiaali vaikuttaa merkitsevästi kaikkiin massaominaisuuksiin lukuunottamatta repäisylujuutta. Keskimääräinen kuidunpituus on lähes yhtä merkittävä tekijä. Kuidunpituusjakautuma vaikuttaa hyvin merkittävästi repäisylujuuteen ja kohtuullisen merkittävästi taittolukuun ja bulkkiin.

Kokonaisvaihtelusta on onnistuttu selittämään suurin osa, R^2 -arvot ovat yleensä yli 80 %. Tehdyissä kokeissa on havaittu, että:

- freeness suurenee sitoutumispotentiaalin pienentyessä tai keskimääräisen kuitupituuden kasvaessa
- repäisylujuus ei korreloi freenessin kanssa
- kuitupituusjakauma n ei ole mukana freenessin mallissa
- sitoutumispotentiaali vaikuttaa hyvin vähän repäisylujuuteen /20/.

Suuri repäisylujuus saavutetaan siis laajan kuitupituusjakauman (pienen n -arvon), suuren keskimääräisen kuitupituuden ja kohtuullisen korkean S -arvon avulla /20/.

Riippumattomia perusparametreja käyttävä menetelmä tuo esiin eri massaominaisuuksien väliset erot ja selvittää, miksi toinen ominaisuus korreloi hyvin freenessin kanssa ja toinen ei. Mannströmin kokeet osoittavat, että suotautumisaika ja vetolujuus korreloivat hyvin freenessin kanssa, mutta repäisylujuus ja taittoluku eivät. Voidaan siis olettaa, että freeness on pikemminkin massaominaisuus ja on periaatteessa väärin käyttää sitä riippumattomana massan parametrina ja yrittää eri yhteyksissä osoittaa freenessin ja eri massaominaisuuksien riippuvuussuhteita /20/.

7.3 Ullmanin parametrit

Ullman on soveltanut Weibullin jakaumaa mekaanisen kuidunpituusjakauman kuvaamiseen jakauman kertymäfunktion komplementtimuodossa:

$$R(x) = \exp (-((x - x_u) / x_0)^m) \quad (2),$$

jossa x_u = sijaintiparametri
 x_0 = skaalausparametri
 m = muotoparametri /34/.

Ullmanin sovituksessa $R(x)$ on Bauer-McNett-kuitulajittelun lajittimen viiralle x tai sitä suuremmille viiroille jäävä massamäärä. Argumentin x arvolle Ullman on ehdottanut käytettäväksi lajittimen viirojen viira-aukon diagonaalia ja sijaintiparametri x_u valitaan siten, että suurelle määrälle lajittelutuloksia saadaan mahdollisimman hyvä sovitus (x_u korjaa viira-aukon digonaalin lajittelussa vallitsevaksi oikeaksi arvoksi) /34/.

Ullman on ehdottanut hiokkeen kuitupituusjakaumaa kuvattavaksi kahdella parametrilla m ja x_d , jotka saadaan laskettua kaavan (2) mukaan seuraavasti:

m = Weibullin jakauman muototekijä, joka kuvaa jakauman leveyttä
 x_d = teoreettinen viirakoko, joka läpäisee 50 % kuiduista ja on siten tietynlaisen jakauman keskikohdan mitta /34/.

7.4 Ominaispinnan ja freenessin välinen suhde

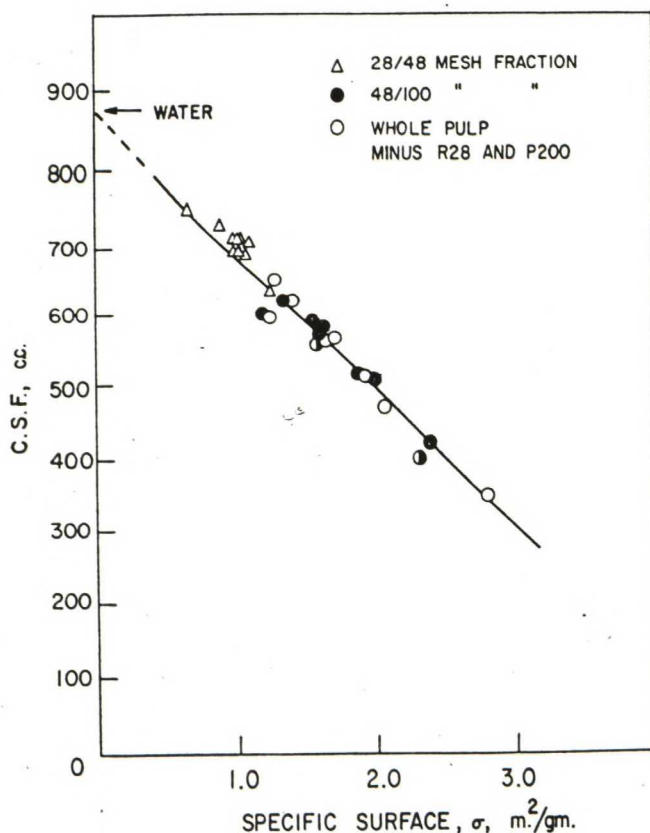
Kuvassa 25 on esitetty 24/48 ja 48/100 jakeiden sekä kokonaisten massojen, joista on poistettu R28 ja P200 jakeet, freenessin kehitys ominaispinnan funktiona. Kuvasta voidaan huomata hyvin vahva käännteinen riippuvuus σ :n ja freenessin välillä alueella CSF 350-750 ml. Tämä viittaisi siihen, että freenessmittaukset riippuisivat ainoastaan σ :sta.

Koska σ :n määrittäminen läpäisevyystekniikalla kestää useita tunteja, 48/100 jakeen freenessmittauksella voidaan määrittää nopeasti partikkelien muototekijä /1/.

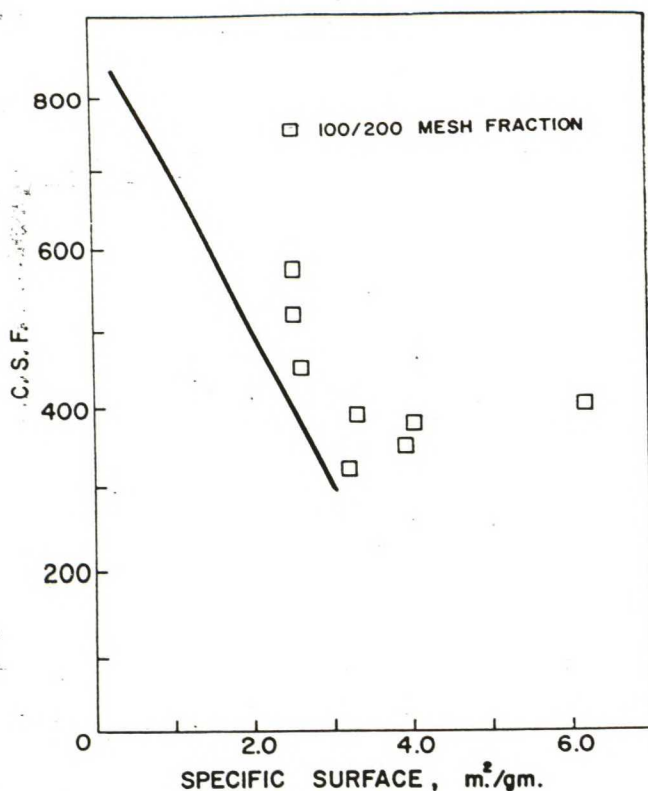
Kuvassa 26 on esitetty 100/200 jakeen freeness σ :n funktiona. Kuvan viiva on sama kuin kuvassa 24. Virheellistä korrelaatiota 100/200 jakeen freenessin ja σ :n välillä kutsutaan "virhefreenesseksi". Freenessmäärittämisessä 48/100 jakeesta vain 0,7 % läpäisee freenesslaitteen sihtilevyn, mutta 100/200 jakeesta häviää jo 3,5 % /1/.

Freenesslaitteen sihtilevyn reikien halkaisija on 0,5 mm kun taas 100/200 jakeen kuitupituuden painokeskiarvo on noin 0,4 mm, minkä seurauksena jakeen partikkeleilla on hyvät mahdollisuudet läpäistä sihtilevy freenessitestin suotautuvuusprosessin aikana. Sen vuoksi massakakun muodostuminen viivästyy ja seurauksena on korkea freenesslukema /1/.

Tietyn keskiarvopartikkelikoon alapuolella freeness lakkaa olemasta luotettava ominaispinnan mitta.



Kuva 25. Freeness ominaispinnan funktiona (keskijakeet) /1/.



Kuva 26. 100/200 jakeen freeness ominaispinnan funktiona (kuvan viiva on sama kuin kuvassa 25) /1/.

Freenesstesti on nopea ja järkevä tapa vertailla ominaispintoja, mutta freenesstestin käyttökelpoisuutta mekaanisten massojen testaukseen rajoittaa kaksi tekijää: hienoainehäviöt ja herkkyyden väheneminen ominaispinnan kasvaessa /25,28,31/.

8 TIKKU- JA KUITUMITTAUSMENETELMÄT

8.1 Tikkujen vaikutus arkin lujuusominaisuuksiin

Mekaaninen massa sisältää aina myös tikkuja. Se, mikä katsotaan tikuksi ja mikä hyväksyttäväksi kuiduksi, on sopimuskysymys ja riippuvainen massan käyttötarkoituksesta /35/.

Tikut ovat haitallisia kokonsa ja/tai huonon sitoutumiskykynsä vuoksi. Isojen tikkujen katsotaan aiheuttavan ratakatkoja paperi- tai painokoneella.

Pienet ja huonosti sitoutuvat tikut taas ovat usein syynä paperin karhentumiseen ja pölyämiseen painatuksessa /35/.

Hiokkeen tikut ovat paksuja, pitkiä, jäykkiä sekä karkeapintaisia. Lisäksi hiokkeen tikut ovat melko erilaisia kuin pitkäkuitujakeen kuidut, joten tikut ovat helposti eroteltavissa lajittelussa /35/.

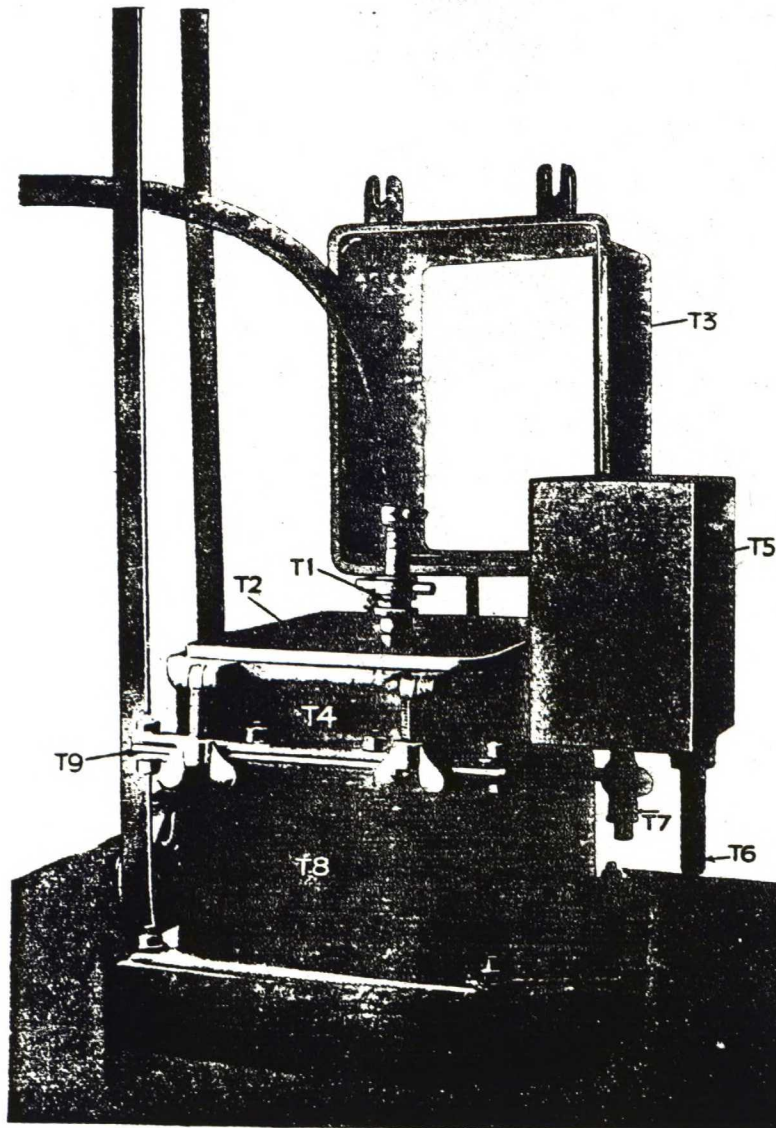
Mekaanisen massan valmistuksessa puu hajoaa kuitukimpuiksi, kuiduiksi ja kuidun osiksi. Kuitukimppuja sanotaan myös tikuiksi, jotka voivat olla haitallisia, ja tikkupitoisuuden määrittämiseksi on rakennettu laitteita, joissa massa lajitellaan rakojen läpi. 150 μm :n rakoleveys on yleinen /35/.

8.2 Somerville-tikkuseula

Somerville-tikkupitoisuus voidaan määrittää sihtilevyllä, jonka raon leveys on tavallisesti 0,15 mm ja pituus 45 mm. Rakoja on sihtilevyssä 756 kappaletta. Joskus jauhettujen massojen, joiden tikkupitoisuus on hyvin pieni ja jotka sisältävät pääasiassa katkenneita ja lyhyitä tikkuja, testaukseen voidaan käyttää sihtilevyä, jonka rakojen leveys on vain 0,075 mm /36/.

Määritykseen vaadittava näytemäärä on 25 absoluuttisen kuivaa massaa ja analysointiaika 40 minuuttia. Sihtilevylle jääneet tikut huuhdellaan keräilyastiaan, jonka pohjalla on 100 meshin viira. Somerville-tikkupitoisuus ilmoitetaan painoprosentteina alkuperäisen näytteen painosta. Määritys voidaan tehdä myös 10 g:n näytteellä, jolloin seulonta-aika on 20 minuuttia /37/.

Somerville-tikkupitoisuustesti vaatii pitkän ajan, minkä vuoksi menetelmä on väistymässä uusien sekä nopeampien ja helpompien testien tieltä /36/.



Kuva 27. Somerville-tikkuseula /36/.

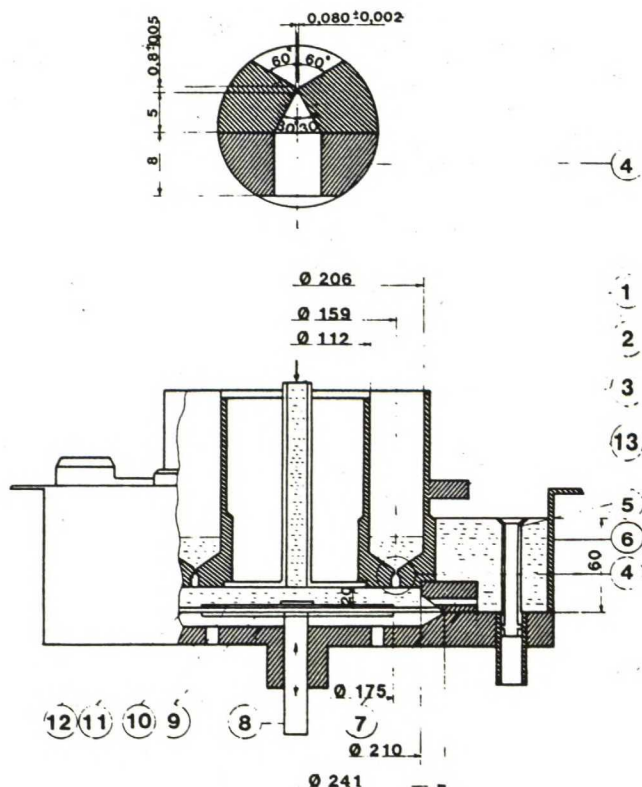
8.3 PFI-minitikkuseula

Painopapereiden kasvavat laatuvaatimukset merkitsevät sitä, että myös 150 μm :n raon läpäisevät partikkelit voivat olla haitallisia ja näiden määrän mittaaminen saattaa olla tarpeen, minkä vuoksi on kehitetty PFI:n (Papierindustriens Forskningsinstitut Norjassa) minitikkuseula, jonka lajitteluraon leveys on 80 μm /38/.

PFI:n minitikkuseula koostuu altaaseen asennetusta sihdistä ja altaan pohjalla sijaitsevasta värähtelevästä kumikalvosta, joka saa aikaan lajitteluvaikutuksen /38,39/.

Massaliete lajitellaan sihtiastian pohjalla sijaitsevan rengasmaisen 80 μm leveän raon läpi. Fraktiointiyksikkö muodostuu kahdesta sylinterimäisestä kappaleesta, sisä- ja ulkorenkaasta, joiden säteiden erotus on sama kui lajitteluraon leveys. Lajitteluvaikutus perustuu värähtelevän kalvon synnyttämään veden sykkivään liikkeeseen. Kalvo vaikuttaa raon alapuolelle sijaitsevaan kammioon johdettuun veteen. Sihdille jäänyt materiaali kuivataan ja punnitaan. Minitikkupitoisuus ilmoitetaan prosentteina lajiteltavan uunikuivan massan määrästä /38/.

PFI-minitikkumääritykseen tarvittava näytemäärä on kaksi grammaa tai hyvin tikkuisilla tai pitkäkuituisilla massoilla vain yksi gramma. Lajittelu-aika on 30 minuuttia /38/.



Kuva 28. Kaaviokuva PFI-minitikkuseulasta /38/.

8.4 Pulmac-tikkuanalysaattori

Pulmac-tikkuanalysaattori on alhaisilla sakeuksilla (alle 1 %) toimiva nopeaan virtaukseen perustuva sihtauslaite /40/.

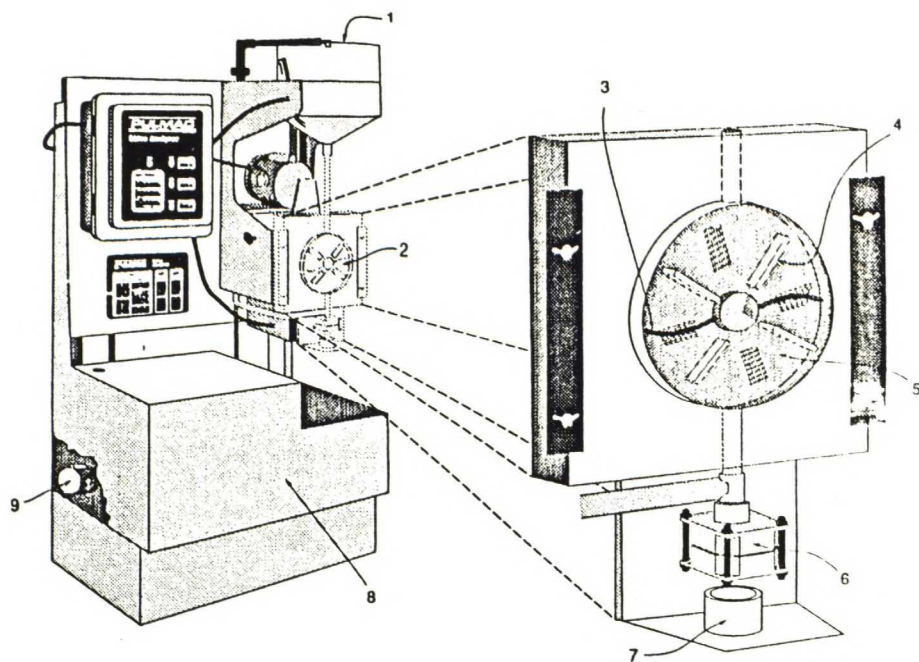
Laite koostuu annosteltavan massan syöttösäiliöstä (1), tulovesisäiliöstä (8) ja laimennetun ja sekoitetun massan sihtikammioista (2), jonka takaseinän muodostaa sihtilevy (5). Sihtilevyssä on leveydeltään 0,10 tai 0,15 mm levyisiä säteittäisiä rakoja /40/.

Tikut erottuvat massasta vakio-olosuhteissa sihtikammiossa. Massakuidut huuhtoutuvat sihtilevyn läpi poistosäiliöön ja siitä edelleen viemäriin. Tikut jäävät sihtikammioon, kunnes sihtausprosessin loppuvaiheessa tyhjennysventtiili (6) avautuu ja tikut huuhtoutuvat keräilyastiaan (7) /40/.

Yhtä mittausta varten vaadittava näytemäärä riippuu näytteen tikkupitoisuudesta: mitä pienempi tikkupitoisuus on, sitä suurempi näyte tarvitaan tarkan punnitustuloksen varmistamiseksi. Maksimiannos vaihtelee alueella 5-40 g riippuen massan laadusta ja käytössä olevasta rakoleveydestä. Liian suuren näytemäärän voi havaita siitä, että tikkujen joukkoon jää selvästi erottuva määrä kuituja /40/.

Laimeasta massanäytteestä saatujen tulosten toistettavuutta voidaan parantaa vähentämällä edelleen lähtömateriaalin sakeutta. Massassa olevien tikkujen jakauma on yleensä hyvin epätasainen ja tikut saadaan jakautumaan tasaisemmin vain voimakkaalla sekoituksella. Mitä laimeampaa massa on, sitä helpompaa on saada osaset jakautumaan tasaisesti ja sitä parempi toistettavuus on tällöin saavutettavissa /40/.

Toistettavuustavoitteen ± 5 % edellyttämä laimennusaste riippuu analysoitavan massan laadusta ja luonteesta. Lyhytkuituinen massa mahdollistaa tavoitetoistettavuuden saavuttamisen sakeammalla näytteellä kuin pitkäkuituinen massa. Tästä syystä esimerkiksi hioketta analysoitaessa voidaan käyttää sakeampaa näytettä kuin kemiallista havupuumassaa testattaessa /40/.

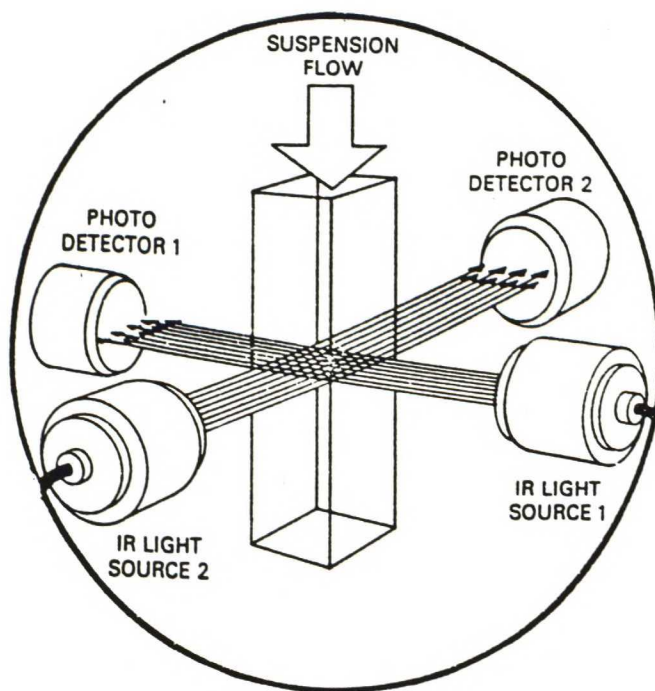


Kuva 29. Pulmac-tikkuanalyssaattori /40/.

8.5 Tellusond STFI 3000 L -tikkuanalyssaattori

1,77 g absoluuttisen kuivaa massaa laimennetaan 0,01 g/l:ksi ja johdetaan tasaisena virtauksena kyvetin, jossa on 90° kulmassa kaksi IR-valonlähdettä ja vastaanottokennoa, läpi. Toisella mitataan tikun valonsäteessä viipymä aika, josta saadaan tikun pituus, ja toisella valon absorption määrä, joka antaa tikun paksuuden. Laite jakaa tikut pituuden ja paksuuden mukaan 16 eri luokkaan ja lisäksi antaa ns. kuituluvun.

Yhden analyysin tekemiseen kuluva aika on n. 10 minuuttia /41/.



Kuva 30. Tellusond-tikkuanalyssaattorin mittausperiaate /42/.

8.6 PQM 400

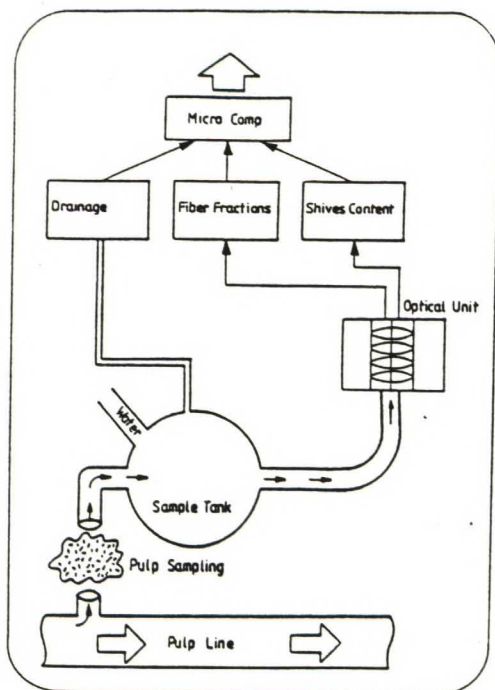
PQM (Pulp Quality Monitor) 400 on on-line -toiminen massanseurantajärjestelmä. Analysoitavat näytteet otetaan tehtaan massajärjestelmästä kiinteästi kytketyillä näytteenottolaitteilla, jotka on yhdistetty PQM 400:aan. Massan laatua karakterisoidaan kolmella suureella, jotka kuvaavat massan vedenpoistoa, kuidunpituutta ja tikkuisuutta /43/.

8.6.1 Mittausperiaatteet

Periaatteltaan analyysit perustuvat tunnettuihin menetelmiin: vedenpoisto-osa on BTG-Källen Drainage Tester DRT-90, tikkuanalyssaattori on periaatteeltaan sama kuin STFI:ssa kehitetty Tellusond ja kuidunpituusmittaus tapahtuu optisesti STFI:ssa kehitetyn menetelmän mukaan /43/.

8.6.2 Näytteenotto

Näytteenotossa tutkittavasta massavirtauksesta ohjataan osavirtaus sivuputkeen, jossa tutkittava näyte suljetaan kahden PQM:n ohjaaman venttiilin väliin, josta näyte huuhdotaan PQM:n analyysiosaan laimennusta varten /43/.

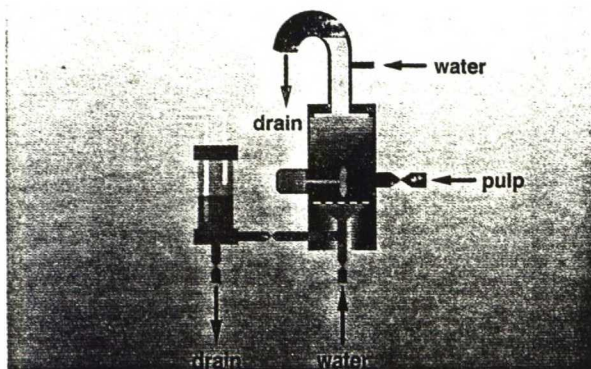


Kuva 31. PQM 400:n pääosat ja näytteenotto /44/.

Varsinainen analyysikalusto koostuu DRT-90-vedenpoistomittarista ja virtausputkistosta optisine antureineen kuidunpituuden luokittelemiseksi ja tikkujen lukumäärän laskemiseksi /43/.

8.6.3 Suotautuvuusmittaus

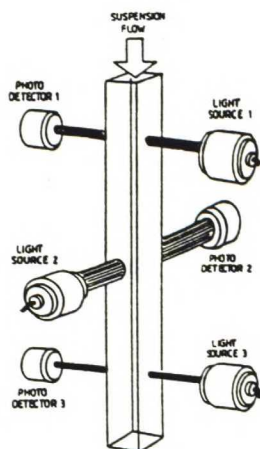
0,3 % sakeuteen laimennetusta massasta muodostetaan kuitukakku, jonka läpi tietty vesitilavuus saa virrata vakio-oloissa. Läpivirtaukseen kulunut aika mitataan ja muutetaan laitteen kontrolliosassa freeness-arvoksi. Kuitukakku voidaan uudestaan hajottaa lisäämällä vettä ja sekoittamalla niin, että 0-massa siivilöityy pois. Kun kakku muodostetaan ja koe uusitaan, saadaan pitkäkuituosuuden suotautuvuutta kuvaava arvo /43,44/.



Kuva 32. PQM 400:n suotautuvuusmittari /43/.

8.6.4 Kuidunpituusmittaus

150 mg/l sakeuteen laimennettu massa johdetaan läpileikkaukseltaan neliömäisen, 10 mm x 10 mm, lasiputken läpi. Kuidut luokitellaan laaditun laskuohjelman avulla kolmeen pituusluokkaan: hienot, keskikokoiset ja pitkät kuidut. Laskuihin käytetyt suureet saadaan putkeen asennettujen kolmen läpimitaltaan 0,1 mm, 0,6 mm ja 3,3 mm kokoisten anturien antamista signaaleista. Signaaleista voidaan laskea myös kuitujen keskipituus /43,44/.

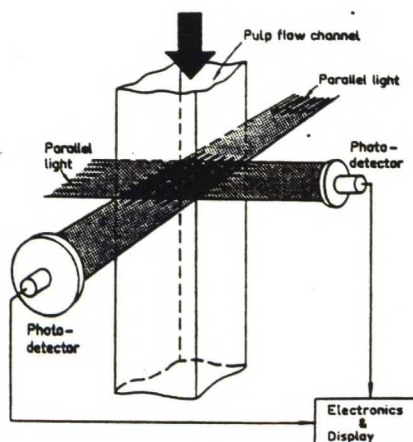


Kuva 33. PQM 400:n optinen kuidunpituusmittari /44/.

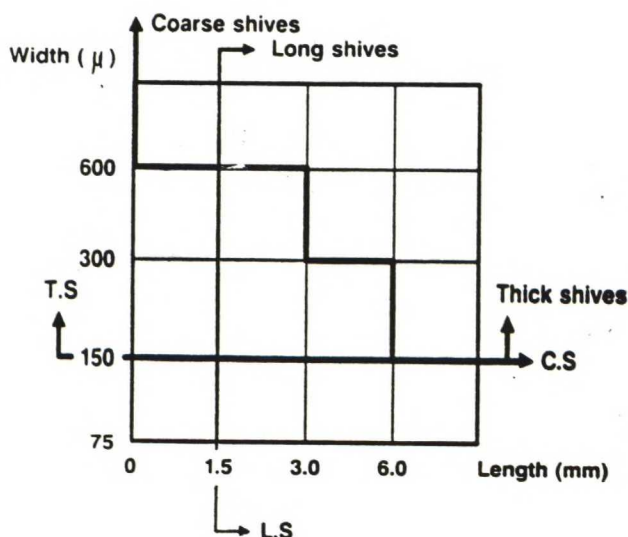
8.6.5 Tikkupitoisuusmittaus

Tikkupitoisuusmittauksessa sakeuden täytyy olla niin pieni (20 mg/l), että periaatteessa vain yksi tikku kerrallaan läpäisee kahden toisiaan vastaan kohtisuoraan suunnatun valodetektorin muodostaman tason. Tikun aiheuttamien häiriösignaalien suuruudesta ja kestoajasta lasketaan tikun dimensiot, jotka voidaan esittää koon mukaan luokiteltuina tai pelkästään tikkujen lukumääränä massan painoyksikköä kohti /43,44/.

Tikkupitoisuusmittauksen lopuksi PQM tulostaa myös tikkujen kokojakauman 4 x 4 matriisissa, joka sisältää leveys- ja neljä pituusluokkaa (kuva 35). Jotkut tehtaat ovat voineet yhdistää matriisin eri tikkuluokkien tikkuluvut esimerkiksi paperikoneen ajettavuuteen ja offset-painatuksen pölyävyystaipumukseen /43,44/.



Kuva 34. PQM 400:n tikkuanalysaattori /44/.



Kuva 35. PQM 400:n tikkuanalysaattorin tikkukokoluokat /44/.

8.6.6 Mittaustarkkuus

Freeness-mittauksessa saavutettava mittaustarkkuus on $\pm 5 \%$, kuidunpituusmittauksessa $\pm 7 \%$ ja tikkupitoisuusmittauksessa $\pm 5 \%$, millä tarkoitetaan standardipoiikkeaman prosentuaalista suhdetta mittaustulokseen /43/.

8.7 PulpExpert

PulpExpert on mekaanisten ja kemiallisten massojen tärkeimpien perusominaisuuksien on-line-laadunmittausasema, joka suorittaa automaattisesti kaikki massan laadunvalvonnan vaiheet /45,46/.

PulpExpert-toiminnot ovat automaattinen näytteenotto kahdeksasta näytteenottopaikasta, testaus, mittaussignaalien muuntaminen mittaustuloksiksi sekä tulosten välitys näyttölaitteille ja tietoverkkoon /45,46/.

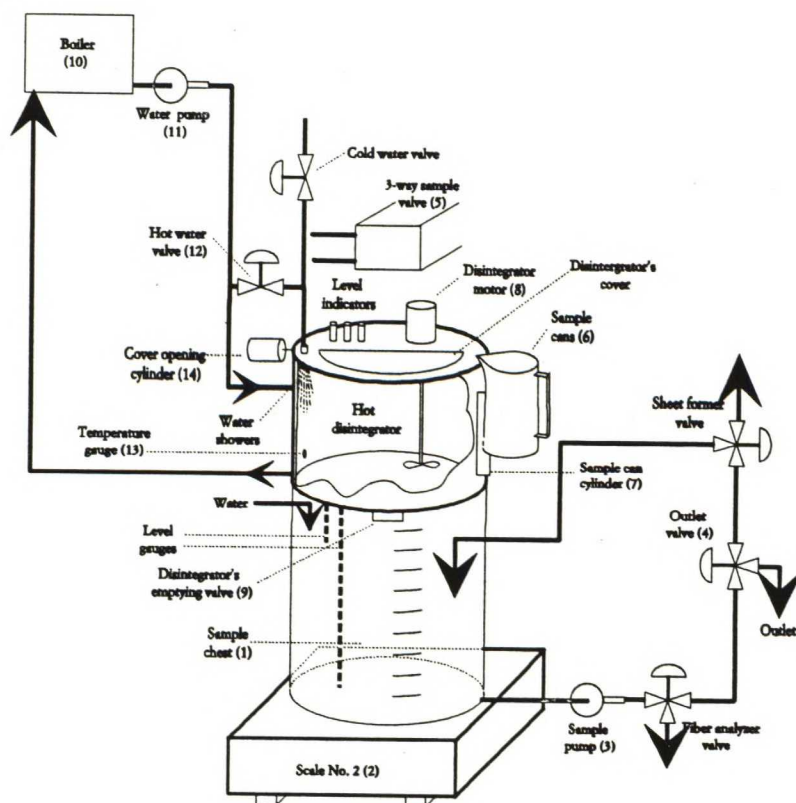
PulpExpertin tärkeimmät toiminnalliset yksiköt ovat:

- näytteenkäsittely-yksikkö
- arkinmuodostus- ja suotautuvuusmittaus-yksikkö
- arkinkäsittely-yksikkö
- vaaleusmittausyksikkö
- roska-analyysiyksikkö ja
- kuituanalyysiyksikkö /45,46/.

8.7.1 Näytteen käsittely

Automaattisten näytteenottolinjojen määrä on enintään kahdeksan, jotka on numeroitu 1,..., 8. Näytteenottopaikkojen kokonaismäärä on 38 ja ne on numeroitu 1,..., 38. Näytteenottopaikat 9,..., 38 on varattu esimerkiksi käsinäytteille. Jokaiselle automaattiselle näytteenottolinjalle määritellään otettavan näytteen määrä ja näytteenottoväli. PulpExpert mittaa näytteen virtauksen ja avaa näytteenottoventtiiliä ajaksi, joka on laskettu riittävän näytteen määrän ja näytteen virtauksen avulla.

Näytteenoton lisäksi näytteen käsittely sisältää mahdollisen kuumahajotuksen (24000 kierrosta, 89°C) ja näytteen laimennuksen /45,46/.



Kuva 36. PulpExpertin näytteenkäsittely-yksikkö /45/.

8.7.2 Arkinmuodostus ja suotautuvuusmittaus

Arkinmuodostuksessa suotautuvuusastiaan otetaan vettä, minkä jälkeen laimennettua massaa pumpataan näyteastiasta suotautuvuusastiaan niin, että lopullinen kokonaismäärä on 1000 ml. Suotautetun arkin tavoitepaino on tavallisesti 1,2 grammaa. Pumpattu massa punnitaan ja suotautuvuusastiassa olevaa sulppua sekoitetaan ilmalla. Suotautuvuusventtiili avataan ja suotautuvuusastian pinta laskee, kun vesi suotautuu viiran läpi ja arkki muodostuu viiralle. Suotautumisen aikana luetaan suotautuvuusastian pinnan arvoja ajan funktiona arvopareina ($aika_i$, $pinta_i$), jotka ovat suotautuvuusikäyrän pisteitä /45,46/.

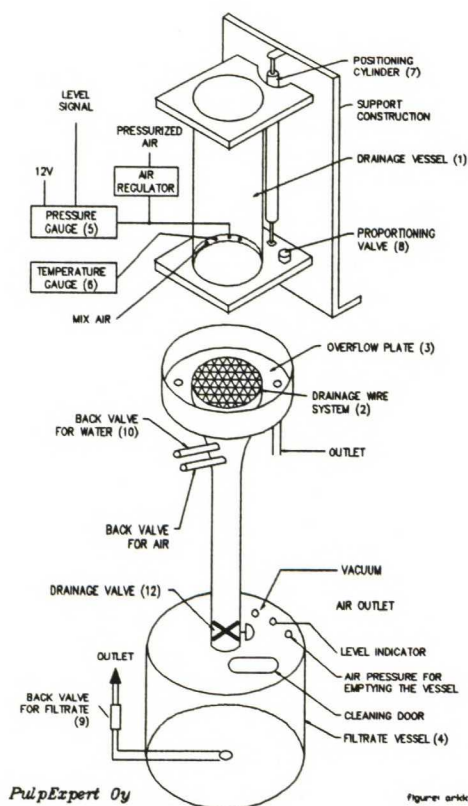
Arkinmuodostuksesta saatavien noin 30 aika-pinta-arvoparien avulla voidaan laskea massan suotautuvuus sovittamalla arvopareihin polynomifunktio käyttämällä pienimmän neliösumman keinoa /45/.

Saatuun suotautuvuuteen CSF_0 tehdään vielä sakeuskorjaus, jolloin saadaan CSF_1 . CSF_1 :een tehdään vielä lämpötilakorjaus, jolloin saadaan lopullinen suotautuvuusarvo CSF /45/.

SR-luku lasketaan kaavalla:

$$^{\circ}SR = (7 - \ln(CSF)) / 0.035 \quad (3).$$

Suotautumisaika (s) määritetään ekstrapoloimalla suotautuvuuskäyrä 1000 ml:aan.

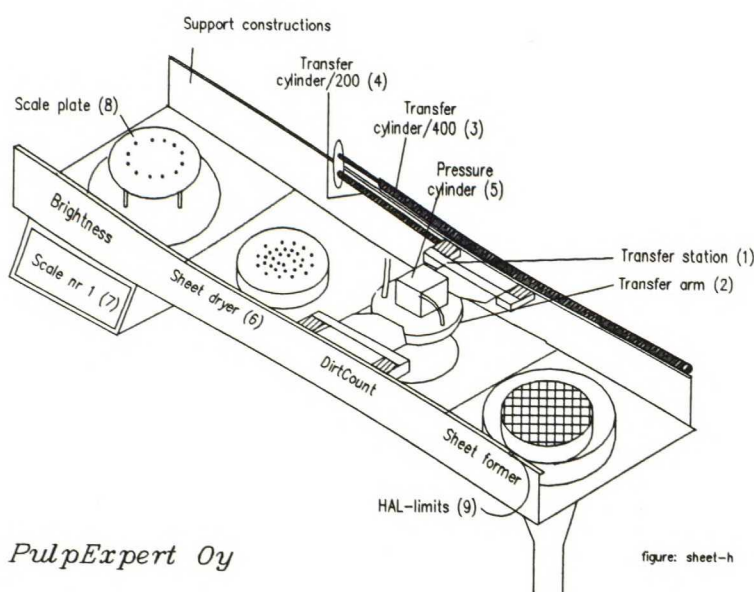


Kuva 37. PulpExpertin arkinmuodostus- ja suotautuvuusmittausyksikkö /45/.

8.7.3 Arkin käsittely ja sakeusmittaus

Arkinmuodostuksen jälkeen arkinsiirtäjä puristaa arkkia 40 kg:n voimalla samalla, kun arkin alle on imetty alipaine. Puristuksen jälkeen arkki puhalletaan ylös paineilman avulla ja arkinsiirtäjä vie sen kuivattavaksi (105°C, kaksi minuuttia), mitä seuraa arkin punnitus sekä vaaleusmittaus ja siirto roska-analyysiä varten /45,46/.

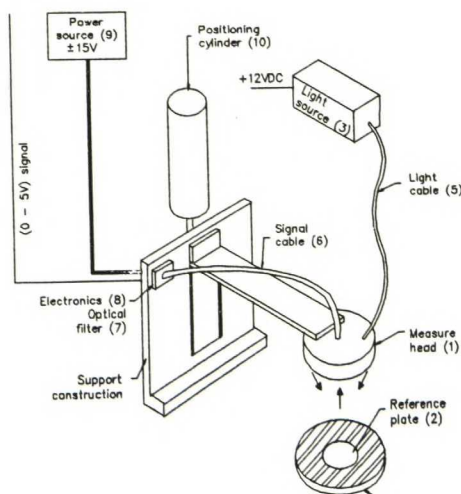
Näytteen sakeus lasketaan näytteen, laimennusveden, arkinmuodostukseen käytetyn sulpun ja arkin massan avulla /45/. Tavallisesti samasta näytteestä tehdään kaksi tai kolme arkkia.



Kuva 38. PulpExpertin arkinkäsittely-yksikkö /45/.

8.7.4 Vaaleusmittaus

Vaaleusmittauksessa kuitukaapelin kahdeksasta eri suunnasta tuleva valo valaisee arkin, arkista heijastunut valo kerätään linssin avulla ja johdetaan optisen suodattimen, jonka aallonpituus on 457 nm, läpi valosensoriin. Jokaisen mittauksen jälkeen vaaleusmittari mittaa referenssilevyn ja kalibroi itsensä /45,46/.



PulpExpert Oy

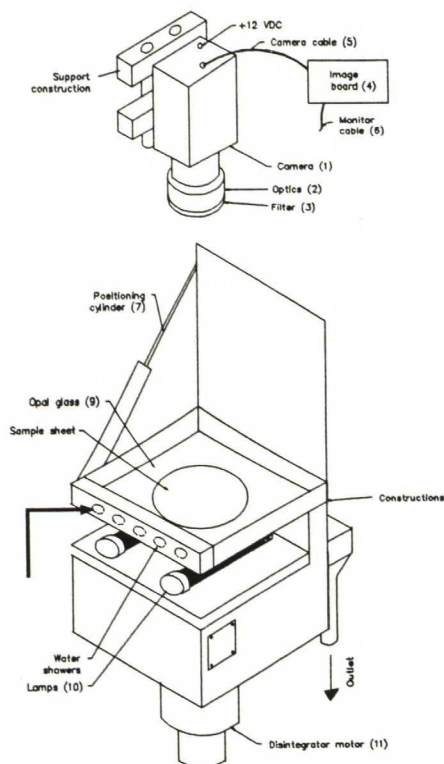
figure: vool-en

Kuva 39. PulpExpertin vaaleusmittausyksikkö /45/.

8.7.5 Roska-analyysi

Roska-analyysissä arkki tuodaan DirtCounter'n opaalilasille, jonka päällä on noin yhden mm:n vesikerros, joka kastelee arkin. Alhaaltapäin tuleva valo valaisee arkin ja videokamera ottaa kuvan arkista /45/.

Digitoitu kuva esitetään 512 x 512 -pikselin matriisissa, jossa jokaisen pikselin intensiteetti voi olla välillä 0-255 (= 256 intensiteettiluokkaa). Tietokoneohjelma skannaa kuvan kahteen kertaan ja ensimmäisessä skannauksessa havaitsee kaikki mahdolliset roskat sekä toisessa skannauksessa analysoi löydetyt roskat ja mittaa roskien pinta-alan ja intensiteetin, minkä mukaan ohjelma jakaa löydetyt roskat viiteen kokoluokkaan sekä ilmoittaa roskien määrän kpl/kg ja mm²/kg kussakin luokassa. Yhden arkin roska-analyysi kestää noin viisi sekuntia. /45,46/.



PulpExpert Oy

figure dft-en

Kuva 40. PulpExpertin roska-analyysiyksikkö /45/.

8.7.6 Kuituanalyysi

Kuituanalyysissä näyteastian sisältämä näyte laimennetaan 0.02 %:n sakeuteen ja sitä kierrätetään näytekierrossa.

Näytekierroksen mittauspisteessä pysäytetty ja valaistu kuitunäyte valokuvataan lasilevyn, jonka koko on 28 x 23 mm, läpi. Otettu kuva on kooltaan 512 x 512 pikseliä, joiden koko on noin 0.025 x 0.038 mm. Kuvanoton jälkeen näytettä kierrätetään ja pysäytetään uutta kuvanottoa varten /45/.

Analyysin sisältämien kuvien määrä on tavallisesti 20-30 kpl/analyysi. Yhdessä kuvassa esiintyy noin 500-600 kuitupartikkelia eli analyysissä kuvattujen kuitupartikkelien määrä tulee olemaan noin 15000-18000 kappaletta. Kuidut jaetaan leveytensä ja pituutensa perusteella 35 kuituluokkaan, joiden leveys- ja pituusrajat voidaan luokitella erikseen.

Analyysin jälkeen systeemi huuhtelee näytekierroksen /45/.

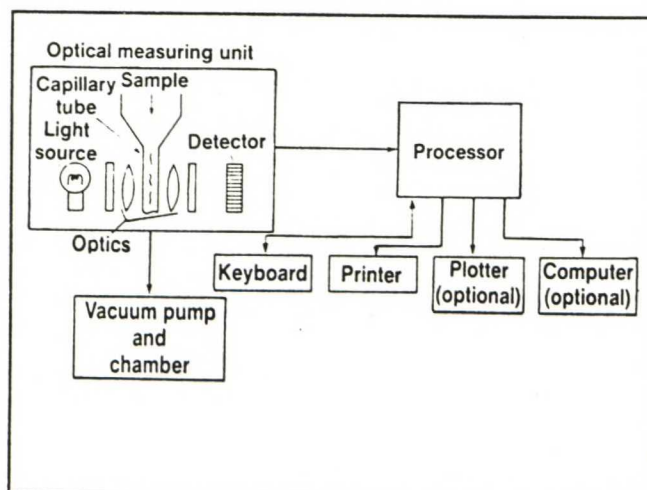
8.8 Kajaani FS-100 ja FS-200-kuidunpituusmittarit

Kuidunpituusmittausperiaate on samanlainen kummassakin mittarissa. Molemmat instrumentit sisältävät kapillaariputken, jonka läpi kuitujen vesisuspensio virtaa. Valonlähde sijaitsee toisella puolella ja detektori toisella puolella kapillaaria. Kun kuitu kulkeutuu kapillaariputken läpi, sen ääriviivat heijastuvat detektorille valonlähteen ja optiikkasysteemin avulla, minkä avulla voidaan laskea kuidun pituus /47/.

8.8.1 Kajaani FS-100-mittari

FS-100-mittari (kuva 41) koostuu seuraavista komponenteista:

- optinen mittausyksikkö (sisältää halogeenilamppuvalonlähteen ja valosoludetektorin)
- matalapainetyhjöpumppu ja kammio, johon analysoidut kuidut kerätään
- mikroprosessoriperusteinen yksikkö, joka toimii laskentalaitteena
- näppäimistö toimintaohjeiden syöttöä varten
- tulostin /47/.



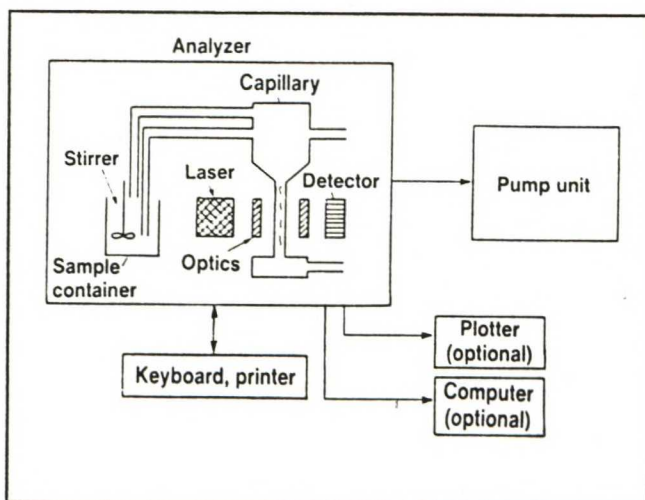
Kuva 41. Kajaani FS-100:n mittausperiaate /47/.

8.8.2 Kajaani FS-200-mittari

FS-200-mittari (kuva 42) koostuu seuraavista komponenteista:

- itse mittari, joka sisältää mikrotietokoneen, mittaus- ja säätöelektroniikan, optisen mittauskokoonpanon, joka koostuu laservalonlähteestä ja detektorista, automaattisen näytteenkäsittelymekanismin sekä CRT-näytöstä
- pumppuyksikkö, joka automaattisesti laimentaa näytteen, poistaa tukokset sekä huuhtelee ja kuivaa näytesäiliön
- käyttönäppäimistö toimintaohjeiden syöttöä varten
- tulostin /47/.

Varmaankin merkittävin FS-200:n tekninen etu on sen herkkyys sekä kyky havaita ja mitata pieniä hiukkasia. Tämä kyky on erityisen tärkeä analysoitaessa massoja, jotka sisältävät paljon hienoaainetta (kuten mekaaniset massat). Lisäksi FS-200:n kuidunpituusmittauksen resoluutio on parempi, FS-200 on käyttäjäystävällisempi eikä kapillaariputken tukkeutumista tapahdu, jonka ansiosta menetetään vähemmän aikaa kokeiden toistamiseen /47,48/.



Kuva 42. Kajaani FS-200:n mittausperiaate /48/.

Taulukko 2.

Kajaani FS-200:n mittaus-tarkkuus /48/.

	SW		HW	
	Replicate measurement	Between units	Replicate measurement	Between units
Arithmetic				
Fibre length, mm	0.669	0.676	0.585	0.586
Std. dev.	0.016	0.042	0.005	0.007
Repeatability %	1.45	12.27	0.29	2.49
Length weighted				
Fibre length, mm	2.512	2.508	0.863	0.858
Std. dev.	0.028	0.054	0.006	0.007
Repeatability %	1.06	4.36	0.43	1.73
Coarseness, mg/mm	0.384	0.379	0.121	0.117
Std. dev.	0.011	0.012	0.002	0.005
Repeatability %	1.71	6.74	0.88	8.12

8.9 Bauer-McNett-kuitulajitin

Kuitujen lajittelulla tarkoitetaan massasulpun jakamista jakeisiin, joiden keskimääräinen kuidunpituus on erilainen.

Bauer-McNett-kuitulajittelussa lajiteltava massa johdetaan avoimeen, pitkulaiseen ja suorakaiteen muotoiseen säiliöön, jonka lyhyet sivut ovat puoliympyrän muotoiset. Rumpumainen ja siivillä varustettu sekoitin, joka on sijoitettu säiliön toiseen päähän, antaa kuitufraktiolle nopean ja vaakasuorassa tasossa tapahtuvan pyörivän liikkeen. Sekoittimen pyörimisnopeus on 580 1/min /49,50/.

Kuituseos kulkee ohi kehykseen kiinnitetyn viiran, joka peittää säiliön pitkällä sivulla olevan vastaavan aukon (150 x 200 mm). Jotta seoksen liikettä voitaisiin tarkemmin ohjata, säiliöön on asennettu seinämä 23 mm:n etäisyydelle viirasta /49/.

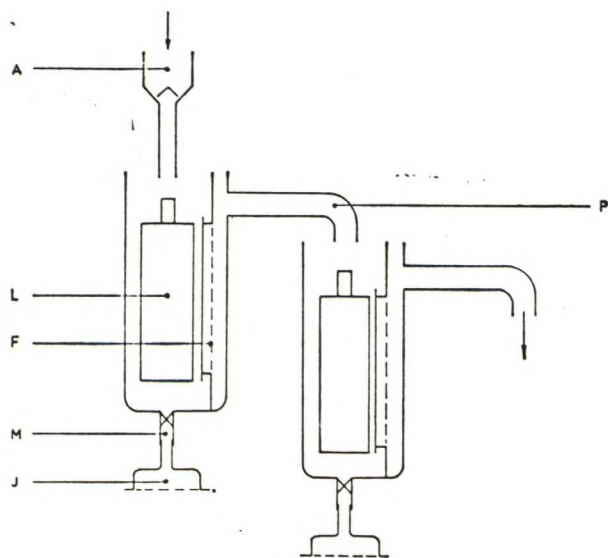
Neljä samanlaista säiliötä on sijoitettu telineeseen porrasmaisesti toistensa viereen niin, että kuituseos voi vapaasti virrata ensimmäisestä ja ylimmästä säiliöstä viimeiseen ja alimpaan säiliöön. Näin aikaansaadaan yhdellä kertaa neljä kuitujaetta ja hienoaineta. Jokaisen viiran pidättämä kuitumäärä sekä kaikki viirat läpäissyt kuitumäärä määritetään ja ilmoitetaan prosentteina alkuperäisen näytteen kuivapainosta /49/.

Lajitteluun tarvittava massamäärä on 10 g ja lajitteluaika 20 min. Läpivirtaava vesimäärä on n. 12 l/min /49/.

Tehdyt tulokset viittaavat siihen, että kuitulajittelujen toistettavuus eri testaajien välillä on ala-arvoinen, kun testataan kemiallisia massoja. Mekaanisilla massoilla erot testaajien välillä ovat paljon pienemmät ja hyväksyttävissä olevaa suuruusluokkaa /51/.

Huolimatta suurista eroista testaajien välillä, erot yhden ja saman testaajan saavuttamien tulosten välillä ovat hyväksyttävissä olevia riippumatta tutkittavasta massasta. Tämä viittaisi siihen, että hajonnan lähde testaajien välillä on pikemminkin testaaja itse /51/.

Bauer-McNett-kuitulajittelu sopii hyvin mekaanisille massoille, joita varten se on alunperin suunniteltukin ja joiden testaamiseen sitä käytetäänkin paljon /51/.



A. Suppilo
F. Viira
J. Suodatinkankaalla varustettu suppilo

L. Sekoitin
M. Poistoputki
P. Ylijuoksu

Kuva 44. Bauer-McNett-kuitulajittimen toimintaperiaate
/49/.

Käyttämällä regressioanalyysiä voidaan laboratoriossa tehtyjen arkkien ominaisuuksia estimoida massasta tehtävien laboratoriomittauksen avulla. Estimoitavista arkkiominaisuuksista voidaan mainita ainakin vetoindeksi, repäisyindeksi ja valonsirontakerroin, joita voidaan estimoida Bauer-McNett-kuitulajittelulla aikaansaatuisten jakeiden, freenessin, Kajaani FS-200:n pituuspainotetun kuitujen keskipituuden tai Forgacsin ja Mannströmin parametrien S, L, d ja n avulla.

Uusi tapa estimoida massan ja paperin ominaisuuksia on käyttää hyväksi massasta tehtäviä on-line-mittauksia, joita ovat esimerkiksi erilaisten laadunvalvontajärjestelmien mittaamat freeness, tikkupitoisuus ja kuidunpituusjakauma. Näillä mittauksilla voidaan estimoida useita laboratoriossa tehtäviä mittauksia ja määrittäviä, kuten esimerkiksi freeness, Bauer-McNett-kuitulajittelun eri fraktioiden osuudet, vetoindeksi, repäisyindeksi, puhkaisulujuus, valonsirontakerroin, tiheys ja tikkupitoisuus. Tällaisia on-line-laadunvalvontajärjestelmiä ovat PQM ja PulpExpert.

PQM:n ja PulpExpertin freeness-, tikku- ja kuitumittausten avulla voidaan riittävällä tarkkuudella estimoida paperin ominaisuuksia, jolloin paperin laatuarvojen seuranta on huomattavasti nopeampaa, eikä työläitä ja hitaita massan ja paperin laboratoriomittauksia enää tarvita.

9.1 Paperin ominaisuuksien estimointi massan laboratoriomäärittelysten avulla

Vaikka joidenkin tutkimusten mukaan freeness onkin vain yksi massaominaisuus, joka voidaan selittää muutaman toisistaan riippumattoman parametrin avulla, yksinkertaisin tapa on yrittää selittää paperin ominaisuuksia pelkästään freenessin avulla, koska freeness käsitetään useassa eri tehtaassa vieläkin tärkeäksi massan ominaisuudeksi.

Regressioanalyysin, jossa selittäjänä on ainoastaan laboratorifreeness, avulla päästään katkeamispituuden ja puhkaisulujuuden estimoinnissa 67-69 %:n selitysasteisiin, mutta repäisyindeksiä ei pelkän freenessin avulla voida ennustaa /32/.

Tehtyjen tutkimusten mukaan vetoindeksin mallille voidaan saada 81 %:n selitysaste käyttämällä selittäjinä freenessiä ja Bauer-McNett-kuitulajittelun R28 jaetta tai Kajaani FS-100:n pituuspainotettua kuitujen keskipituutta /18/.

Otto Forgacsin mukaan paperin ominaisuudet on selitettävissä vain kahden riippumattoman massan perusominaisuuden avulla, jotka ovat massan pituustekijä L ja muototekijä S. L:n ja S:n välinen korrelaatio oli tehdyissä kokeissa vain 0,01, joten L ja S ovat toisistaan riippumattomia parametreja /1/.

Forgacsin mukaan lujuusarvoille (repäisyindeksi, katkeamispituus ja puhkaisulujuus) saatiin regressioanalyysissä, jossa selittäjinä olivat L ja S, 86-91 %:n selitysasteet. Mannström ei saavuttanut samoilla selittäjillä lujuusarvoille kuin 63-74 %:n selitysasteet. Ero syntyi ilmeisesti käytettyjen massojen tyyppieroista ja koeaineiston kokoeroista /1,18,20,32/.

Käyttämällä selittäjinä Mannströmin parametreja S (omnaissuotautumisvastus) ja L päästään lujuusarvojen ennustamisessa 77-89,5 %:n selitysasteisiin ja jos otetaan mukaan vielä parametrit d ja n, päästään 80-89,5 %:n selitysasteisiin.

Parametri n korreloi repäisyindeksin kanssa siten, että repäisylujuus paranee, kun n pienenee /18/.

9.2 Paperin ominaisuuksien estimointi on-line-laadunvalvontajärjestelmien avulla

9.2.1 PQP

PQP (Pulp Quality Predictor), PQM:iin yhdistetty ohjelmajärjestelmä, on kehitetty hyödyntämään PQM:n antamaa on-line-tietoa. PQP-järjestelmä koostuu seuraavista osista:

1. Tietokantasysteemi, johon varastoidaan PQM-mittaukset sekä laboratorion testitulokset
2. Off-line-analyysisysteemi, jonka avulla lasketaan massan laatumallien vakioden ja kertoimien arvot
3. Reaaliaikainen analyysisysteemi, joka virittää mallit käyttäen mallin sovitusta joka kerran, kun uusi mittaus tulee saataville. Analyysisysteemi suorittaa myös mallien sovituksen
4. Reaaliaikainen arkin lujuus- ja optisten ominaisuuksien laskennan suorittaminen joka kerta, kun PQM-mittaus on tehty
5. Esittämissysteemi, joka tulostaa halutut trendit ja raportit. Esittämissysteemi sisältää myös toiminnon, joka mahdollistaa käyttäjälle tutkia massaominaisuuksien muutosten seurauksia (esimerkiksi kuinka paljon vetolujuus kasvaa, jos freeness laskee 10 ml ja jos pitkäkuituosuus laskee yhden prosenttiyksikön verran) /53/.

Estimoinnissa PQM:lla ja PQP:lla saavutetaan seuraavanlaisia selitysasteita:

- laboratoriofreeness 97 %
- Bauer-McNett R28 jae 82 %
- Bauer-McNett P200 jae 77 %
- Pulmac-tikkupitoisuus 94 %
- puhkaisuindeksi 87 %
- vetoindeksi 92 %
- repäisyindeksi 74 %
- valonsirontakerroin 93 %
- opasiteetti 87 % /44/.

Saavutettujen tulosten perusteella voidaan sanoa, että PQM:n ja siihen liitetyn PQP:n avulla voidaan luotettavasti estimoida paperin lujuusominaisuuksia. Lisäksi PQM:n etuna on nopeus: yhteen analyysiin kuluva aika on n. 10 minuuttia, kun vastaaviin laboratoriomäärityksiin kuluu useita tunteja.

Näinollen tuotannonohjauksellisesti PQM on hyvin käyttökelpoinen laadunvalvontajärjestelmä.

Taulukko 3. PQP:n tarkkuus /52/.

		<u>PQP</u> <u>accuracy</u>	<u>Testing</u> <u>accuracy</u>
Tensile, Nm/g	+/-	2.0	2.0
Tear, mNm ² /g		0.4	1.2
Density, kg/m ³		10	21
Scattering, m ² /kg		1.0	2.1

Taulukko 4. PQP:lla muodostettujen mallien selitysasteita /44/.

Physical Properties		Range	Std. error in the prediction	Correlation Coefficient	PQM Variables	Offset	Regression Coefficients C ₁ C ₂	
Burst Index	KPa.m ² /g	(1.45-2.30)	.15	.82	CSF	2.55	-.00209	
			.13	.87	CSF, LF	.99	-.00239	.0430
			.14	.84	CSF, MiniSh	2.77	-.00190	-.00014
Tensile Index	N.m/g	(24.2 - 38.0)	2.12	.83	CSF	40.7	-.0299	
			1.51	.92	CSF, MiniSh	47.6	-.0286	-.00359
Scattering Coefficient	m ² /kg	(46.8 - 57.6)	1.36	.89	CSF	59.9	-.0260	
			1.16	.93	CSF, FINES	37.0	-.0185	.652
Opacity	%	(90.7 - 94.5)	0.60	.85	CSF	95.2	-.0092	
			0.57	.87	CSF, FINES	87.8	-.0068	.211
Tear Index	mNm ² /g	(9.57 - 11.80)	0.56	.74	CSF, CSF ² , LM			

9.2.2 PulpExpert

Tämä diplomityön tavoitteena oli saada laskettua arkin lujuusarvojen malleille tarvittavat vakioden arvot. Mallien selittäjänä toimivat PE:n mittaamat freeness, pituuspainotettu kuidun keskipituus sekä kuitujakauma ja kuitujakauman avulla tehdyt muunnokset, joilla voidaan jakaa kuitujakauma kuituihin ja tikkuihin.

Saavutetut tulokset on esitetty kokeellisessa osassa.

10 HIOMON OHJAUS LABORATORIO- JA ON-LINE-MÄÄRITYSTEN PERUSTEELLA

10.1 Hiokeseosten laatusuureiden estimointi

Pyrittäessä ohjaamaan koko hiomon prosessia, on edellytyksenä, että yksittäisten hiomakoneiden muutosten vaikutukset hiomon seosmassan laatusuureisiin voidaan estimoida. Koska yksittäisen hiomakoneen tuottaman massan laatusuureet pystytään estimoimaan hiomakoneen toimintamallin avulla, on sopiva lähestymistapa tällöin pyrkiä löytämään sellaiset mallit, joiden avulla hiokeseoksen ominaisuudet pystytään estimoimaan seoskomponenttien ominaisuuksista /54/.

Sopivin sekoitusmalli on sellainen, joka pysyy muuttumattomana erilaisissa hiomon toimintaoloissa ja jonka avulla seosmassan laatusuureet pystytään estimoimaan mahdollisimman tarkasti lähtien yksittäisten hiomakoneiden prosessisuureista /54/.

10.2 Hiomakoneen säätöstrategiat

Hiomakoneen säätöstrategia on käsitteenä laajempi kuin säätötapa. Yleisesti ottaen voidaan sanoa, että säätöstrategia toteutetaan jollakin säätötavalla /55/.

Tavallisimpia säätöstrategioita ovat vakio teho-, vakiopaine-, vakio tuotantonopeus-, vakioenergian ominaiskulutus-, vakio freeness- ja integroitu hiomon säätöstrategia /55/.

10.2.1 Vakio teho

Vakio teho-ajotavassa hiomakoneen moottorin ottama sähköteho pidetään jatkuvasti vakiona. Ajotavassa hiokkeen freeness ja tuotantonopeus pienenevät jatkuvasti, joten suurten laatu- ja tuotantovaihtelujen välttämiseksi hiomon kivien teräykset täytyy porrastaa huolellisesti /55/.

10.2.2 Vakio paine

Vakio paine-ajotapa on hyvin samantapainen kuin vakio teho-ajotapa, koska jälkimmäisessä vakio teho saavutetaan juuri paineen avulla. Tietyllä paineella kiven tylsyessä kitkakerroin pienenee, joten vakio paine-ajotavalla hiomakoneen tehonotto on teräysjakson lopussa pienempi kuin alussa. Käytännössä hiontapainetta nostetaan teräysjakson aikana sekä vakio paine-että vakio teho-säätöstrategiassa, mikä lähentää niitä toisiinsa /55/.

10.2.3 Vakio tuotantonopeus

Vakio tuotantonopeus-ajotavassa terävällä kivellä tehonotto on alhainen, mutta se kasvaa jatkuvasti kiven tylsyessä. Teräysjakson aikana saatava tuotanto on pienempi ja laatu tasaisempi kuin vakio teho- tai vakio paine-ajotavassa. Teräysväli on melko lyhyt /55/.

10.2.4 Vakio energian ominaiskulutus

Hiokkeen laadun vaihtelujen vähentämiseksi on kehitetty vakio energian ominaiskulutus-ajotapa, jossa tehonoton ja tuotantonopeuden suhde pidetään vakiona. Strategian huonona puolena on teräysjakson alussa alhainen tuotantonopeus ja lyhyet teräysvälit /55/.

10.2.5 Vakio freeness

Freenessin pitäminen vakiona koko teräysjakson ajan pitää myös muut massan laatuominaisuudet suhteellisen vakioina, minkä vuoksi vakio freeness-ajotapa on yleistynyt. Teräysjakson keskimääräinen tuotantonopeus on suurempi kuin vakio EOK-ajotavassa, mutta pienempi kuin vakio teho-, paine- tai tuotanto-ajotavoissa. Teräysväli on lähes yhtä lyhyt kuin vakio EOK-ajotavassa /55/.

10.2.6 Integroitu säätöstrategia

Integroidussa säätöstrategiassa koko hiomon summamassan laatu vakioidaan. Eri hiomakoneiden laatutavoitteet voivat olla erilaisia. Hiomon keskimääräinen tuotantonopeus on lähes yhtä suuri kuin vakio teho-strategiassa ja myös kivien keskimääräiset teräysvälit ovat suhteellisen pitkiä. Kavennettaessa yksittäiselle hiomakoneelle sallittua laatuvaihtelualuetta päädytään lopulta hiomakonekohtaiseen säätöstrategiaan /55/.

10.3 Hiomon laadunvalvonta ja ohjaus

Hiomon laadunvalvonta käsittää monia erilaisia massasta ja laboratorioarkeista tehtäviä määrittäyksiä, joista tärkeimpiä ovat massan freeness ja tikkupitoisuus sekä arkin optiset ja lujuusominaisuudet. Nämä määrittäykset kertovat hyvin paljon itse hiontavaiheen ja sen jälkeisten toimintojen, kuten lajittelun ja valkaisun, onnistumisesta.

Laboratoriomäärittäysten avulla saadaan tietoa siitä, mihin suuntaan hiontaprosessi on menossa ja millä tavalla prosessia pitää muuttaa halutun tuloksen aikaansaamiseksi. Prosessimuuttujien ja laboratoriomäärittäysten arvojen perusteella voidaan lisäksi tehdä johtopäätöksiä hiomakiven kunnosta ja teräystarpeesta.

Tietokoneohjelmien avulla prosessin ohjaus voidaan suorittaa myös automaattisesti syöttämällä tehdastietokoneelle laboratoriomäärittäysten arvot, joiden perusteella tietokoneohjelma huolehtii hiomon prosessimuuttujien säädöstä.

Laboratoriomäärittäykset voidaan korvata erilaisten massa-analysointilaitteiden tekemien määrittäysten avulla, jolloin analysointilaitteiden tekemien massamäärittäysten avulla voidaan estimoida paitsi laboratorion massamäärittäyksiä myös laboratorion arkkimäärittäyksiä, kuten esimerkiksi vetoindeksi, ilmanläpäisevyys ja valonsirontakerroin.

Vastaavasti kuin laboratoriomääritystenkin kohdalla massa-analysointorin tietokone voi olla yhdistetty tehdasjärjestelmän tietokoneeseen, jolle massa-analysointorin tietokone siirtää mittausarvoja ja joka tietokoneohjelman avulla säätää hiomon prosessimuuttujia.

Verrattaessa laboratoriomäärityksiä ja massa-analysointorien tekemiä määrityksiä huomattavin ero on määritysten nopeus: kun laboratoriarkkien teko kestää useita tunteja, voidaan massa-analysointorin on-line-määritysten avulla estimoida arkkiominaisuuksia prosessin ohjaustarkoitukseen riittävällä tarkkuudella noin kymmenessä minuutissa eli massa-analysointorin ollessa kyseessä voidaan jo puhua hiomon on-line-säädöstä.

Hiomon säädössä on tärkeää saada tietoa massasta mahdollisimman nopeasti, ettei jouduta tilanteeseen, jossa prosessi pääsee "ryömimään" ei-haluttuun tilaan laboratoriomääritysten välillä ja jolloin tasalaatuisen massan tuottaminen on vaikeaa.

KOKEELLINEN OSA

11 KOKEELLISEN OSAN TAVOITE

Kokeellisen osan tavoite oli tilastomatemaaattisin keinoin selvittää, voidaanko massasulpun fysikaalisilla ominaisuuksilla estimoida valmiin laboratorioarkin ominaisuuksia.

Koska laboratoriorioarkin valmistus ja testaus näytteenottoineen kestää standardin mukaan noin kolme tuntia sisältäen sakeusmääritykset ja laboratorioarkin kuivauksen, on ymmärrettävää, että muutamassa minuutissa tehtävä analyysi, jonka perusteella voitaisiin estimoida esim. arkin lujuusominaisuuksia, on kiinnostava.

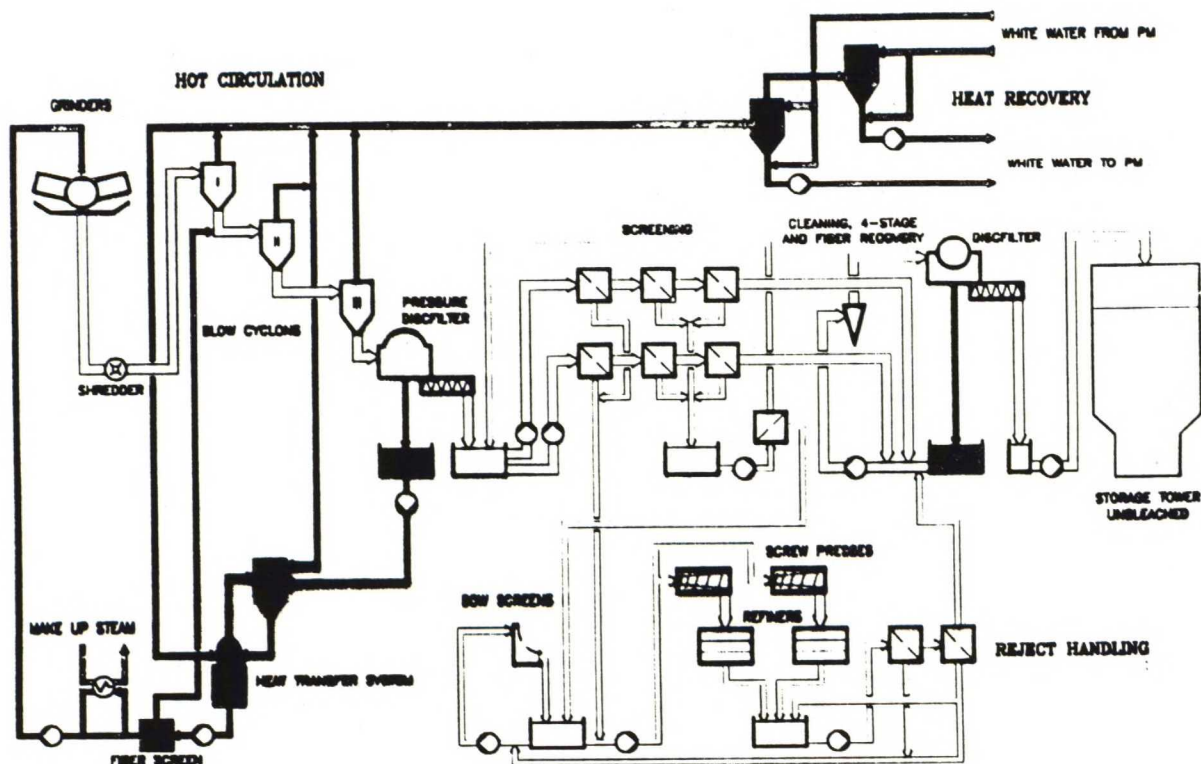
Tällainen analyysi, joka kertoisi tärkeimmät massan laatuominaisuudet, voisi lisäksi toimia myös massanvalmistusprosessin ohjauksen työkaluna.

12 KOESUUNNITELMA JA NÄYTTEENOTTO

Koesuunnitelman mukaan kokeellinen osa koostui neljästä vaiheesta:

- näytteenotto
- näytteiden testaus laboratoriossa ja PulpExpertillä
- estimointimallien muodostus
- tulosten analysointi.

Koesuunnitelman mukaan näytteitä otettiin yhteensä 59 kappaletta. Näytteet otettiin Voikkaan Paperitehtaan painehiomolta.



Kuva 45. Voikkaan painehiomon prosessikaavio.

Näytteistä 20 kpl otettiin 1-linjan painelajittelun akseptista eli 1-B-1 sihdin akseptista, 20 kpl rejektijauhatuksen jälkeisen lajittelun akseptista eli 3-B-sihdin akseptista, 10 kpl pyörrepuhdistuslaitoksen 1-portaan akseptista, 5 kpl eri kivien alta ja 4 kpl PK 11:lle menevästä valkaistusta ja jälkijauhetusta massasta.

Alunperin koesuunnitelmassa oli vain kolme ensinmainittua koepaikkaa eli 50 koepistettä, mutta koepaikkoja ja -pisteitä lisättiin myöhemmin, koska haluttiin malleja, joiden avulla voitaisiin estimoida kaikkien erilaisten massojen ominaisuuksia.

Peruste kolmen näytepaikan käyttämiselle oli se, että siten saatiin enemmän hajontaa eri koepisteiden välille, sillä tiedettiin, että rejektijauhatuksen jälkeisellä lajitellulla massalla (3-B aksepti) on suuremmat lujuusominaisuudet kuin päälinjojen painelajittelu aksepteilla (esim. 1-B-1 aksepti).

Lisäksi valitsemalla mukaan pyörrepuhdistuslaitoksen aksepti oli takoitus saada arvoja myös kahden näytepaikan arvojen väliin, sillä pyörrepuhdistuslaitoksen syöttö koostuu päälinjojen 1 ja 2 painelajittelun aksepteista sekä rejektilinjan lajittelun akseptista.

Näytteet otettiin kertanäytteinä ja siten, että 10 ensimmäistä näytekierrosta käsitti näytteenoton painelajittelun ja rejektilajittelun aksepteista (20 koepistettä) ja seuraavat 10 seuraavaa näytekierrosta näytteenoton paine- ja rejektilajittelun sekä pyörrepuhdistuksen aksepteista (30 koepistettä). Kivenalus- ja valmismassanäytteet otettiin erikseen neljänä eri näytekierroksena. Näytteet otettiin aina kierroksen aikana yhtäaikaan joka näytepisteestä.

13 NÄYTTEIDEN LABORATORIOMITTAUKSET

Näytteet testattiin Kaukas Oy:n tutkimuskeskuksessa Lappeenrannassa. Koska kyseessä oli laimeita massoja, kuumahajotusta ei suoritettu. Kivenalusmassat seulottiin. Näytteistä valmistettiin 100 g/m² laboratorioarkkeja, joiden valmistuksessa ei käytetty kiertovesiarkkimuottia. Märkäpuristuksen paine oli 3,2 bar ja kesto 2,5 minuuttia. Märkäpuristuksia tehtiin kaksi ja puristusten välillä imukartongit vaihdettiin. Märkäpuristetut arkit kuivattiin 2 tuntia kuivausrummussa, jonka sisälämpötila oli 120 °C. Kuivauksen jälkeen arkit ilmastoitiin.

Näytteiden testaus voidaan jakaa kahteen eri osaan:

- massasulpusta tehtävät mittaukset
- laboratorioarkeista tehtävät mittaukset.

Massasulpusta tehtiin seuraavat mittaukset:

- sakeus
- Pulmac-tikkupitoisuus
- freeness (CSF)
- Bauer-McNett -kuitulajittelu 30, 50, 100 ja 200 meshin viiroille
- Bauer-McNett-kuitupituus (laskennallinen)
- Kajaani FS-200 -kuidunpituus
- Kajaani FS-200 -pituusmassa
- Tellusond massa-analyysi, jossa mitattiin
 - kuituluokat 1-16 (hieno jae)
 - kuituluokat 5-16 (karkea jae)
 - kuituluku
 - tikkupitoisuus
- PulpExpert -kuituanalyysi kaikista koepisteistä ja Voikkaan paperitehtaan painehiomon PulpExpert-robotilla sakeus, freeness ja vaaleus painelajitteluun ja rejektilajitteluun aksepteista.

Laboratorioarkeista tehtiin seuraavat mittaukset:

- neliömassa
- tiheys
- bulkki
- vetoindeksi
- repäisyindeksi
- Bendtsen-karheus 1 kp:n paineella mitattuna
- Bendtsen-karheus 5 kp:n paineella mitattuna
- Bendtsen-ilmanläpäisevyys
- vaaleus
- valonsirontakerroin
- opasiteetti
- Zerospan-vetolujuus (määritettiin Teknillisen Korkeakoulun Puunjalostustekniikan laitoksen paperitekniikan laboratoriossa)

Kesken näytteenoton lopetettiin Kajaani FS-200 -pituusmassa-mittaukset, koska arvot eri pisteissä olivat lähes samoja, sekä Bauer McNett -kuitupituuden laskeminen, koska se oli ristiriidassa Kajaani FS-200:n ja PulpExpertin mittaaman pituuspainotteisen kuitupituuden kanssa.

14 KUITUANALYYSIN MITTAUSMENETELMÄ

Laboratorion mittausten estimointiin käytettiin PulpExpertin määrittämää massanäytteen kuitupartikkelien pituus- ja leveysjakaumaa. Kuitupartikkelit jaoteltiin pituuden perusteella seitsemään ja leveyden perusteella viiteen luokkaan eli muodostunut kuitumatriisi sisälsi 35 eri luokkaan.

14.1 PulpExpert-kuitumatriisi

Pituusluokkajaossa käytettiin muunneltua Kajaani FS-200:n pituusluokkajakoa. Jako oli seuraava:

-	pituusluokka 1	(P1)	0,0	-	0,2	mm	pitkät kuitupartikkelit
-	pituusluokka 2	(P2)	0,2	-	0,6	mm	pitkät kuitupartikkelit
-	pituusluokka 3	(P3)	0,6	-	1,0	mm	pitkät kuitupartikkelit
-	pituusluokka 4	(P4)	1,0	-	1,5	mm	pitkät kuitupartikkelit
-	pituusluokka 5	(P5)	1,5	-	2,0	mm	pitkät kuitupartikkelit
-	pituusluokka 6	(P6)	2,0	-	3,0	mm	pitkät kuitupartikkelit
-	pituusluokka 7	(P7)	3,0	-	5,0	mm	pitkät kuitupartikkelit

Leveysluokkajako oli seuraava:

- leveysluokka 1 (L1) yli 0,00 mm leveät kuitupartikkelit
- leveysluokka 2 (L2) yli 0,06 mm leveät kuitupartikkelit
- leveysluokka 3 (L3) yli 0,10 mm leveät kuitupartikkelit
- leveysluokka 4 (L4) yli 0,15 mm leveät kuitupartikkelit
- leveysluokka 5 (L5) yli 0,30 mm leveät kuitupartikkelit

Kukin luokka nimettiin leveys- ja pituusluokan nimen mukaan: esim. L2P5 luokka sisälsi yli 0,06 mm leveät ja 1,5 - 2,0 mm pitkät kuitupartikkelit.

Jako ko. pituusluokkiin perustuu hiokkeesta ja sen jakeista tehtyihin tutkimuksiin. Otto Forgacsin vuonna 1963 perustavaa laatua olevan tutkimuksen mukaan hiokekuitujen jakeiden kuidun keskipituudet olivat seuraavat:

- R28-jakeen keskimääräinen kuitupituus on n. 2,0 mm
- R48-jakeen keskimääräinen kuitupituus on n. 1,0 mm
- R100-jakeen keskimääräinen kuitupituus on n. 0,6 mm
- R200-jakeen keskimääräinen kuitupituus on n. 0,3 mm

Lisäksi pituusjaottelussa jatkettiin luokkia aina 5,0 mm:iin asti, koska tiedettiin, että ehjän kuusikuidun pituus on n. 4,0-5,0 mm.

Leveysluokkien jaossa pyrittiin noudattamaan jo määriteltäviä puukuidun fysikaalisia ominaisuuksia ja tikkujen dimensioita. Kuusikuidun keskimääräinen paksuus on n. 60 mikronia eli 0,06 mm, joten yksi luokkaraja määriteltiin tällä perusteella. Kaksi muuta rajaa valittiin erilaisten tikkupitoisuusmittausmenetelmien perusteella. Somerville-tikkupitoisuusmittauksessa tikuksi määritellään yli 0,15 mm leveät partikkelit ja Pulmac-tikkupitoisuusmittauksessa yli 0,10 tai yli 0,15 mm leveät partikkelit.

Leveysluokan 5 raja (yli 0,30 mm leveät partikkelit) valittiin, jotta nähtäisiin, onko massassa näin paksuja ja tikkuja.

Selvennykseksi mainittakoon, että koska leveysluokille oli mahdollisuus antaa ainoastaan alaraja, ovat leveysluokat kumuloituvia:

Esim. 1: $L1P1 + L1P2 + L1P3 + L1P4 + L1P5 + L1P6 + L1P7 = 100 \%$

Esim. 2: Jos halutaan tietää, paljonko massanäyte sisälsi 0-0,06 mm leveitä ja 1,5 - 2,0 pitkiä kuitupartikkeleja, on k.o. yksittäisen luokan sisätämä prosenttiosuus laskettavissa vähennyslaskulla $L1P5 - L2P5$. Näin muodostetun yksittäisen luokan nimi on $L11P5$.

14.2 Mittausperiaate

PulpExpertin kuituanalyysissä n. 0,015 %:ksi laimennettua massanäytettä kierrätetään näytekammion kautta. Näytekierto pysäytetään hetkeksi, jolloin kuitunäytteestä otetaan valokuva lasilevyn läpi kameralla, joka on sijoitettu näytekammion yläpuolelle.

Näytekammiota valaistaan rengasmaisella valolla ylhäältäpäin, jolloin kuidut näkyvät/erottuvat vaaleina näytekammion tummaa taustaa vasten.

Kuva digitoidaan ja jaetaan pikseleihin, joiden koko on 0,048 x 0,035 mm, joka on myös samalla koko analyysin erotuskyky. Kuiduksi luokiteltavat partikkelit erotetaan toisistaan määrittämällä niiden keskiviivat eli ns. selkäranka sekä kartoittamalla kuitujen risteymät. Tämän jälkeen kuidulle etsitään paras mahdollinen reunaviiva, missä kuidun rajaaminen pituus- ja leveyssuunnassa tapahtuu kuidun ja taustan intensiteettieron perusteella. Analyysin jälkeen näytekierto pestään vedellä.

Ennen analyysin aloittamista näytekammion tummasta taustasta otetaan kalibrointikuva, jotta tiedetään, mitkä osat analyysikuvasta eivät ole kuituja. Kalibrointikuva suodattaa analysoitavasta kuvasta mm. lasilevyn ulkopuolella olevat liat.

Kuituanalyysissä voidaan käyttää optiona myös ilmakuplien poistoa, jos näytteessä tai laimennusvedessä on paljon ilmaa. Analyysikuvan partikkeli luokitellaan ilmakuplaksi muodon, koon ja intensiteetin perusteella, sillä ilmakuplat ovat pyöreitä, tavallisesti tietyn kokoisia ja erottuvat taustasta kuituja suuremman intensiteettieron perusteella.

14.3 Toistettavuus

Diplomityössä samasta näytteestä ajettiin kolme 10 analyysikuva sisältävää kuituanalyysiä, joista laskettiin keskiarvot kuitumatriisin eri luokkien sekä kuitupituuden arvoille.

Yksi analyysikuva sisälsi n. 500-600 kuitupartikkelia, joten yhden analyysin sisältämä laskettujen kuitujen määrä oli n. 5000-6000 kappaletta ja keskiarvojen laskennan perustana n. 15000-18000 laskettua kuitupartikkelia.

Seurattaessa analyysin kulkua, huomattiin, että kuidun pituus- ja leveysjakauma vakiintui tavallisesti lopulliseen muotoonsa jo viiden ensimmäisen analyysikuvan jälkeen, kun laskettu oli n. 2500-3000 kuitua. Samoin vakiintui myös PulpExpertin määrittämä pituuspainotettu kuitupituus.

Tutkittaessa analyysin toistettavuutta ja luotettavuutta 95 % luottamusväli kolmen eri mittauksen välillä oli n. 5-6 % kuitumatriisin luokan arvosta.

Tehdaskokemusten mukaan analyysikuvien kuitujakauman vakiintuminen riippuu jonkin verran analysoitavasta massalaadusta.

15 KOETULOKSET

Diplomityön tavoitteena oli pyrkiä muodostamaan mahdollisimman hyvät estimointimallit laboratoriossa mitatuille massa- ja laboratorioarkkiominaisuuksille käyttäen mallien selittäjinä PulpExpertin määrittämää massanäytteen kuitupartikkelien leveys- ja pituusjakaumaa eli PulpExpert-kuitumatriisin luokkia sekä PulpExpert-kuitupituutta.

15.1 Mallien muodostusmenetelmä ja mallien selittäjien valinta

Matemaattisia estimointimalleja alettiin muodostaa käyttäen työkaluna Statistix 4.0 -tilastomatematiikkaohjelman lineaarista regressioanalyysiä. Kuituanalyysin tuloksista tehtiin kolmenlaisia erilaisia muunnoksia:

- neliöjuuri PulpExpert-luokista
- neliö PulpExpert-luokista
- jako yksittäisiin luokkiin, joissa leveydellä on sekä ala- että yläraja.

Muunnosten tekemisen tarkoitus oli tutkia, löydetäänkö niiden ja alkuperäisten PulpExpert-luokkien yhdistelmien avulla parempia estimointimalleja kuin pelkkien PulpExpert-luokkien ja PulpExpert-kuitupituuden avulla.

Kokeilemalla huomattiin, että neliömuunnosten avulla ei päästä parempiin selitysasteisiin kuin alkuperäisten PulpExpert-luokkien avulla, mutta neliöjuurimuunnoksilla oli PulpExpert-luokkien kanssa yhdistelminä käytettyinä pieni selitysasteita parantava vaikutus.

Yksittäisten luokkien avulla pyrittiin oikeastaan vain vahvistamaan alkuperäisten PulpExpert-luokkien avulla muodostettujen mallien fysikaalisia perusteita. Lisäksi mukaan lisäselittäjäksi otettiin laboratoriofreeness, koska se oli mitattu kaikista koepisteistä.

Parhaat mallit eri ominaisuuksille muodostettiin viidellä eri selittäjien yhdistelmällä:

- PE-luokat ja PE-kuidunpituus
- PE-luokat, PE-kuidunpituus ja laboratoriofreeness
- PE-luokat, PE-kuidunpituus ja neliöjuurimuunnokset
- PE-luokat, PE-kuidunpituus, neliöjuurimuunnokset ja laboratoriofreeness
- yksittäiset luokat

Selitettäessä jotakin ominaisuutta mielivaltaisen selittäjä määrän avulla, muodostettavan mallin selitysaste nousee aina, kun malliin otetaan mukaan uusi selittäjä, vaikka todellisuudessa selitettävän ominaisuuden ja uuden selittäjän välillä ei olisi lähes ollenkaan yksinkertaista korrelaatiota.

Diplomityössä käytetty tilastomatematiikkaohjelma ilmoittaa käytettäessä lineaarista regressioanalyysiä paitsi selitysasteen (R^2) myös sovitetun selitysasteen (adjusted R^2), jonka arvo kertoo koko mallin hyvyyden eli eri selittäjien yhdistelmän sopivuuden selitettävälle ominaisuudelle.

Sovitettu selitysaste saavuttaa tietyllä selittäjäyhdistelmällä maksimi arvonsa ja lähtee tämän jälkeen laskuun vaikka selittäjiä lisättäisiin ja vaikka selitysaste vielä paraneekin.

Ensimmäinen valintaperuste selittäjäyhdistelmälle oli sovitetun selitysasteen maksimi arvon löytäminen.

Toinen valintaperuste oli ohjelman regressiomallin selittäjien P-arvo. Yksittäisen selittäjän P-arvo kertoo, kuinka luotettava selittäjä on: mitä pienempi P-arvo on, sitä pienempi on sattuman osuus selitettäessä jotakin ominaisuutta k.o. selittäjän avulla.

Kun selittäjän P-arvo on pienempi kuin 0,05, yksittäinen selittäjä sopii malliin hyvin.

Muodostettaessa estimointimalleja eri ominaisuuksille, malliin hyväksyttävien selittäjien piti täyttää kummatkin valintaperusteet. Käytännössä tavallisesti ensimmäisen valintaperusteiden täyttävä selittäjäyhdistelmä sisälsi useita yksittäisiä selittäjiä, jotka eivät täyttäneet toista valintaperustetta.

15.2 Muodostettujen mallien fysikaaliset perusteet

Tässä kohdassa käsitellään malleja, joilla on paras mahdollinen sovitettu selitysaste, mikä kertoo muodostetun mallin sopivuuden hyvyyden k.o. mallin ominaisuuden estimointiin sekä tarkastellaan yksittäisiä luokkia ja sitä, miten yksittäiset luokat selittävät estimoitavaa ominaisuutta.

15.2.1 Pulmac-tikkupitoisuus

Paras sovitettu selitysaste Pulmac-tikkupitoisuudelle saavutetaan selittäjäyhdistelmällä, joka sisältää laboratoriofreenessin ja PE-luokat L1P4, L2P4, L4P6, L3P7, L2P5, L2P6 ja L3P6, joista merkitsevin on L1P4 ja vähiten merkitsevä L3P6.

Koska Pulmac-tikkupitoisuusmittauksessa tikuksi määritellään 0,1 mm:n rakoa läpäisemättömät kuitupartikkelit, voisi helposti luulla, että parhaat selittäjät löytyisivät L3-luokista (yli 0,1 mm leveät kuitupartikkelit). Syy siihen, miksi näin ei ole, on se, että Pulmac-tikkujae sisältää mikroskoopilla tarkasteltuna selvästi paljon ehjiä ja pitkiä kuituja, joten Pulmac-tikkupitoisuusmittari jaottelee helposti tikuksi myös kuituja niiden pituuden perusteella, koska pitkät kuidut eivät tikkupitoisuusmittauksen aikana pääse läpäisemään lajittelurakoa.

Tämä selittää sen, miki parhaat selittäjät löytyvät pituusluokista P4-P7 (1,0-5,0 pitkät kuitupartikkelit).

Selittäjäyhdistelmän PE-kuidunpituus ja PE-luokat paras yksittäinen selittäjä on PE-kuidunpituus, mikä myös tukee teoriaa pitkien kuitujen joutumisesta tikkujakeeseen.

Selitysaste Pulmac-tikkupitoisuudelle on mallien huonoimmasta päästä, mikä ilmeisesti selittyy pitkien kuitujen ominaisuuden jäädä tikkujakeeseen vaihtelusta ja sitä kautta Pulmac-tikkupitoisuusmittauksien suuresta hajonnasta. Pulmac-tikkupitoisuusmittauksia olisi pitänyt tehdä yhdestä koepisteestä ainakin kolme rinnakkaismäärittystä.

Diplomityössä mittauksia tehtiin ainoastaan yksi/koepiste. Yksittäisistä luokista parhaita selittäjiä ovat L11P4, L11P1, L33P7, L44P6, L11P5, L11P7, L22P5. Paras näistä on L11P4 .

15.2.2 Bauer-McNett -kuitulajittelun R30-jae

Paras sovitettu selitysaste R30-jakeelle saavutetaan selittäjäyhdistelmällä, joka sisältää PE-luokat L1P6, L2P2 ja L3P7 sekä neliöjuurimuunnokset PE-luokista L1P1, L1P5, L2P5, L2P7, L3P2, L3P3, L3P6 ja L4P3.

Parhaat selittäjät näistä ovat L1P6 sekä neliöjuurimuunnokset L1P5, L2P5 ja L2P7 eli näyttää siltä, että R30-jakeen selittäjiksi sopisivat luokat P5-P7 (1,5-5,0 mm).

Yksittäisistä luokista parhaita ovat L11P5, L11P6, L22P6, L22P7, L33P6 ja L33P7, mikä myös kertoo sen, että sopivia selittäjiä ovat luokat P5-P7 (1,5-5,0 mm). Kuitenkin parhaan selitysasteen antava malli sisältää useita L3-luokkia (yli 0,10 mm) leveät kuitupartikkelit, mikä kertoo siitä, että Bauer-McNett-kuitulajittelu ei lajittele kuituja ainoastaan pituuden perusteella.

Parhaiten selittävä yksittäisistä luokista on L11P6 ja PE-luokista L1P6, mikä on odotettavaakin, koska R30-jakeen keskimääräinen kuitupituus on hiokkeella hieman yli 2,0 mm.

15.2.3 Bauer-McNett -kuitulajittelun R50-jae

Paras sovitettu selitysaste R50-jakeelle saavutetaan selittäjäyhdistelmällä, jossa selittäjinä ovat PE-luokat L1P4, L3P3, L3P5, L4P5 ja L4P6 sekä neliöjuurimuunnokset PE-luokista L1P3, L2P4 ja L3P2.

Parhaat näistä ovat neliöjuurimuunnos PE-luokasta L1P3 sekä PE-luokat L1P4, L3P5, L4P5 ja L4P6 eli luokat P3-P6 (0,6-3,0 mm pitkät kuitupartikkelit). Yksittäisistä luokista parhaat ovat L11P3, L11P4, L22P3, L22P4, L33P5 ja L44P6 eli pituusluokiltaan samoja kuin parhaat PE-luokat tai niiden muunnokset.

Yksittäisillä luokilla saavutetaan selitysasteessa parempi lopputulos kuin PE-luokilla tai niiden muunnoksilla. Parhaiten selittävä yksittäisistä luokista on L11P3 ja PE-luokista L1P3.

P3-luokkaan kuuluvat kuitupartikkelit, joiden pituus on 0,6-1,0 mm. Bauer-McNett -kuitulajittelun R50-jakeen keskimääräinen kuitupituus on n. 1,0 mm, joten on luonnollista, että juuri P3-luokka selittää parhaiten R50-jaetta.

15.2.4 Bauer-McNett -kuitulajittelun R100-jae

Paras sovitettu selitysaste R100-jakeelle saavutetaan selittäjäyhdistelmällä, jossa selittäjinä ovat yksittäiset luokat L11P1, L11P3, L11P4, L11P6, L11P7, L22P5, L33P1, L33P2, L44P4 ja L22P2.

Näistä parhaat selittäjät ovat L11P3, L11P4, L11P6 ja L33P2 eli todennäköisesti PE-luokat P2-P4 (0,2-1,5 mm pitkät kuitupartikkelit) ovat parhaita selittäjiä R100-jakeelle. Parhaiten selittävä yksittäisistä luokista on L11P3 ja PE-luokista L1P3 eli samat kuin R50-jakeella.

Ilmeisesti parhaiten selittävät yksittäiset luokat ovat R50- ja R100 jakeella samat, koska niiden keskimääräiset kuitupituudet asettuvat samalle PE:n pituusvälille 0,6-1,0 mm. Bauer-McNett -kuitulajittelusta tiedetään, että eri jakeiden kuitupituus on kutakuinkin normaalijakautunut ja että nämä jakaumat menevät osittain päällekkäin eli esim. R50- ja R100-jae sisältävät kumpikin 0,8 mm pitkiä kuitupartikkeleja.

15.2.5 Bauer-McNett -kuitulajittelun R200-jae

Paras sovitettu selitysaste R200-jakeelle saavutetaan selittäjäyhdistelmällä, jossa selittäjinä ovat laboratoriofreeness, kaikenlevyisiä ja -pituisia PE-luokkia sekä niiden muunnoksia.

Kolme parasta selittävää PE-luokkaa ovat L1P1, L1P7 ja L4P2 tai niiden muunnokset, jotka ovat selittäjinä lähes kaikissa muodostetuissa malleissa. Näistä kahden viimeisen luokan ja R200-jakeen keskimääräisen kuitupituuden välille ei voida tehdä mitään loogista fysikaalista yhteyttä. Paras selittäjä näistä on L1P7.

Paras selittävä yksittäinen luokka on kuitenkin L11P2 (0,2-0,6 mm pitkät kuitupartikkelit), johon R200-jakeen keskimääräinen kuitupituus sopii. Toinen yksittäinen luokka, joka toimii selittäjänä useassa mallissa on L11P1 (0,0-0,2 mm pitkät kuitupartikkelit).

15.2.6 Bauer-McNett -kuitulajittelun P200-jae

Paras sovitettu selitysaste P200-jakeelle saavutetaan selittäjäyhdistelmällä, jossa selittäjinä ovat PE-luokat L1P1, L1P2, L1P4, L1P6, L3P5 ja L3P7, neliöjuurimuunnokset PE-luokista L1P3, L1P7 ja L2P7 sekä laboratoriofreeness.

Paras selittäjä on L1P1, joka myös esiintyy useissa parhaissa malleissa, joissa on eri määrä selittäjiä. P1-luokkaan kuuluvat 0,0-0,2 mm pitkät kuitupartikkelit, joten onkin odotettavissa, että tämä luokka selittäisi P200-jaetta, koska hiokkeen P200-jakeen keskimääräinen kuitupituus on 0,08-0,1 mm. Yksittäisistä luokista hyviä selittäjiä ovat L11P1, L22P1 ja L11P5.

P200-luokan huono selitysaste johtunee siitä, että P200-jae on jae, joka ei kuulu mihinkään muuhun jakeeseen. P200-jakeen osuus lasketaan vähentämällä 100 %:sta muiden jakeiden osuudet, joten on todennäköistä, että virhe ja hajonta laskettaessa P200-jakeen osuutta on suurempi kuin muissa jakeissa.

15.2.7 Vetoindeksi

Paras sovitettu selitysaste vetoindeksille saavutetaan selittäjäyhdistelmällä, jossa selittäjinä ovat laboratoriofreeness, PE-kuidunpituus sekä PE-luokat L1P4, L1P5, L1P6, L1P7, L2P1, L2P2, L2P7, L3P7, L3P2 ja L3P3.

Laboratoriofreenessiä käytettiin PE-freenessin sijaan, koska PE-freenessiä ei määritetty kaikista 50:stä koepisteestä.

Viisi parasta selittäjää ovat laboratoriofreeness sekä PE-luokat L1P6, L1P7, L2P1 ja L2P5.

Parhaat PE-luokat kertovat siitä, ettei pelkillä pitkillä eikä lyhyillä kuiduilla saavuteta parasta mahdollista vetolujuutta, vaan massan täytyy sisältää molempia sopivassa suhteessa.

Kuitenkin pelkkä PE-luokka L1P7 yksin selittää 69 % vetoindeksistä.

Freenessin mallin mukaanotto parantaa PE-luokkien ja PE-kuidunpituuden avulla muodostetun mallin selitysstetta 4 % ja L1P7 ja freeness kahdestaan selittävät 79 % vetoindeksistä.

Muunnosten vaikutus on melko vähäinen.

Yksittäisistä luokista parhaita vetoindeksin selittäjiä ovat L11P1, L11P2, L11P6, L11P7, L22P2, L2225 ja joista kahdella, L11P7 ja L11P2, voidaan selittää 77 % vetoindeksistä.

Paras yksittäinen vetoindeksin selittäjä on L11P2, jolla päästään 69 % selityssteeeseen. Tämä kertoo hienoaineen tärkeästä roolista pitkien kuitujen yhteensitojana.

15.2.8 Repäisyindeksi

Paras sovitettu selitysstee repäisyindeksille saavutetaan selittäjäyhdistelmällä, jossa selittäjinä ovat laboratoriofreeness, PE-luokat L1P6, L1P7, L2P5 ja L2P7 sekä neliöjuurimuunnokset PE-luokista L1P2, L3P3, L3P5, L3P6 ja L4P6.

Paras selittäjä on L1P7, joka selittää 80 % repäisyindeksistä. Jo kolmen selittäjän yhdistelmällä päästään 90 % selityssteeeseen. Nämä selittäjät ovat L1P6, L1P7 ja L2P5.

Jos verrataan veto- ja repäisyindeksin selittäjiä ja selityssasteita, voidaan huomata, että repäisyindeksi ei ole niin riippuvainen hienoaineen läsnäolosta sidostenmuodostajana eikä näinollen korreloi niin hyvin freenessin kanssa kuin vetoindeksi.

Muunnokset eivät paranna selityssastetta kuin n. 0,5 % eli käytännössä eivät ollenkaan. Samoin käy, kun freeness otetaan selittäjäksi malliin.

Yksittäisistä luokista neljä parasta ovat L11P2, L11P6, L11P7 ja L22P7, joiden avulla saavutetaan jo 90 % selityssaste. Kaksi selittäjää yksittäisistä luokista, L11P2 ja L11P7, selittävät 86 % repäisyindeksistä, mikä kertoo sen, että kuitujen sidosaineeksi tarvitaan kuitenkin aina hienoainetta, vaikka repäisylujuus saavutetaankin pääasiassa pitkien kuitujen avulla.

15.2.9 Tiheys

Paras sovitettu selityssaste tiheydelle saavutetaan selittäjäyhdistelmällä, jossa selittäjinä ovat PE-luokat L1P1, L1P5, L2P7, L3P5 ja L3P6, neliöjuurimuunnokset PE-luokista L1P7, L2P6 ja L4P2 sekä laboratoriofreeness.

Suurin osa selittäjistä ovat kolmesta pisimmästä luokasta eli luokista P5-P7 (1,5-5,0 mm pitkät kuitupartikkelit). Tiheys pienenee, kun hienoaineen osuus pienenee ja kun pitkien kuitujen ja tikkujen osuus massassa kasvaa. Laboratoriofreeness on paras selittäjä, jonka avulla päästää 64 % selityssasteeseen. Kun freeness kasvaa, tiheys pienenee, mikä on odotettavaa, koska freeness on suotautuvuusominaisuus: mitä suotautuvampi massa on, sitä pienempi on sen tiheys.

Yksittäisistä luokista L11P7 ja L33P4 ovat selittäjiä, jotka esiintyvät useimmissa parhaissa malleissa, jotka on muodostettu tiheydelle eri selittäjäyhdistelmillä.

Yksittäisistä luokista L11-luokkien (0,0-0,6 mm leveät kuitupartikkelit) osuudella näyttää olevan tiheyttä kasvattava vaikutus, koska yksittäiset kuidut ovat joustavia ja ne mukautuvat toisiinsa kuituverkostossa paremmin kuin tikut.

15.2.10 Karheus (5 kp)

Paras sovitettu selitysaste karheudelle mitattuna 5 kp:n paineella saavutetaan selittäjäyhdistelmällä, jossa selittäjinä ovat PE-luokat L1P1, L1P5, L1P6, L1P7, L2P2, L2P5, L2P7, L3P1, L3P7 ja L4P4, neliöjuurimuunnos PE-luokista L2P3 sekä laboratoriofreeness.

Parhaita selittäjiä PE-luokista ovat L1P1, L1P5, L1P6, L1P7, L2P7 ja L3P7. Yksittäisistä luokista parhaita selittäjiä ovat L11P1, L11P7, L22P5 ja L33P7.

Karheus riippuu paljon siitä, paljonko massassa on tikkuja ja paljonko yksittäisiä kuituja sekä hienoainetta. Laboratoriofreeness ei vaikuta selitysasteeseen kovin paljon.

15.2.11 Karheus (1 kp)

Paras sovitettu selitysaste karheudelle mitattuna 1 kp:n paineella saavutetaan selittäjäyhdistelmällä, jossa selittäjinä ovat PE-luokat L3P7, L4P4 ja L4P6, neliöjuurimuunnokset PE-luokista L1P2, L1P3, L1P4, L2P3, L1P7 ja L3P1 sekä laboratoriofreeness.

Parhaita selittäjiä ovat L3P7 sekä neliöjuurimuunnokset luokista L1P2, L1P3 ja L2P7. Yksittäisistä luokista parhaat selittäjät ovat L11P7, L22P5 ja L33P7, joista luokka L33P7 vaikuttaa karheuteen eniten eli tässäkin tapauksessa voidaan todeta, että karheus riippuu paljon massan tikkupitoisuudesta.

Laboratoriofreeness ei nosta saavutettua selitystasetta kuin 2-3 %.

15.2.12 Bendtsen-ilmanläpäisevyys

Paras sovitettu selitysaste ilmanläpäisevyydelle saavutetaan selittäjäyhdistelmällä, jossa selittäjinä ovat PE-luokat L3P2, L3P7, L4P2 ja L4P6, neliöjuurimuunnokset PE-luokista L1P3, L1P6, L2P1 ja L3P3 sekä laboratoriofreeness.

Paras yksittäinen selittäjä on laboratoriofreeness, joka selittää 83 % ilmanläpäisevyydestä. Paras selittävä PE-luokka on L4P6, sekä parhaat selittävät muunnokset luokista L1P3 ja L1P6. Yksittäisistä luokista parhaita ovat L11P2, L11P3, L22P4 ja L33P4, joista suurin vaikutus ilmanläpäisevyyteen on luokalla L33P4.

Ilmanläpäisevyys käyttäytyy samoin kuin tiheys ja karheus: kaikkia näitä ominaisuuksia voidaan selittää massan tikkupitoisuudella sekä hienoaineen tai lyhyiden yksittäisten kuitupartikkelien, jotka muodostavat tiheän kuituverkoston, avulla.

15.2.13 Valonsirontakerroin

Paras sovitettu selitysaste valonsirontakertoimelle saavutetaan selittäjäyhdistelmällä, jossa selittäjinä ovat PE-luokat L1P1, L1P4, L1P5, L1P6, L1P7 ja L2P3, neliöjuurimuunnokset PE-luokista L2P6, L3P1 ja L3P2, PE-kuidunpituus sekä laboratoriofreeness.

Parhaita selittäjiä PE-luokista tai niiden selittäjistä ovat L1P1, L1P4, L1P5, L1P7 ja L3P1.

Yksittäisistä luokista parhaita selittäjiä ovat luokat L11P4, L11P6, L11P7 ja L22P5 eli valonsirontakertoimeen vaikuttavat eniten kapeat tai lyhyet kuitupartikkelit, joilla on paljon valoa siroavaa pintaa ja jotka pystyvät muodostamaan paljon sidoksia.

15.2.14 Opasiteetti

Paras sovitettu selitysaste opasiteetille saavutetaan selittäjäyhdistelmällä, jossa selittäjinä ovat PE-luokat L1P1, L2P7, L3P3 ja L4P3, neliöjuurimuunnokset PE-luokista L1P2, L1P3, L1P5, L1P7 ja L2P6 sekä laboratoriofreeness.

Paras yksittäinen selittävä PE-luokka on L1P1 joka selittää 58 % valonsirontakertoimesta ja selittäjäyhdistelmällä L1P1, neliöjuurimuunnokset luokista L1P2, L1P3 ja L1P5 sekä laboratoriofreeness saavutetaan 72 % selitysaste.

Yksittäisistä luokista parhaat selittäjät ovat L11P1, L11P5, L22P2 ja L22P4. Opasiteettia selittävät parhaiten luokat, jotka kuvaavat massan hienoaainetta ja sitoutumiskykyisintä osaa massasta. Mitä enemmän näitä jakeita massa sisältää, sitä parempi opasiteetti massalla on. Mitä enemmän karkeaa tikkuja että massa sisältää, sitä harvemmat kuituverkoston massa muodostaa ja sitä pienempi opasiteetti massalla on.

15.2.15 Zero-Span -vetolujuus

Paras sovitettu selitysaste Zero-Span -vetolujuudelle saavutetaan selittäjäyhdistelmällä, jossa selittäjinä ovat PE-luokat L1P1, L1P2, L1P3, L1P4, L1P5, L1P6, L1P7, L2P1, L2P3, L2P7, L3P5, L4P3 ja L4P4 sekä PE-kuidunpituus.

Selittäjät ovat kaikista pituus- ja leveysluokista, joten johtopäätöksiä Zero-Span -vetolujuuden fysikaalisista perusteista on vaikea tehdä.

Paras selittäjä L2P3 selittää vain 7,5 % koko ominaisuudesta ja parhaan mallinkin selitysaste on vain 54 %, joten voidaan sanoa, että Zero-Span -vetolujuus on erittäin vaikea tai lähes mahdoton mallittaa kuitujen pituus- ja leveysjakauman avulla.

16 MALLIEN SELITYSASTEET JA LUOTETTAVUUDEN ARVIOINTI

Liitteessä 4 on esitetty listaukset regressioanalyysien tuloksista. Jokaiselle ominaisuudelle on muodostettu kaksi mallia, joista toinen täyttää ensimmäisen mallille asetetun ehdon (sovitettu selitysaste on mahdollisimman suuri) ja toinen toisen mallille asetetun ehdon (yksittäisen mallin selittäjän P-arvo saa olla korkeintaan 0,05).

Malleja, jotka täyttävät nämä kummatkin ehdot ja joiden selityssaste on ehtojen täyttämisenkin jälkeen yli 75 %, on neljä:

- vetoindeksi (selityssaste 93 %)
- repäisyindeksi (selityssaste 92 %)
- tiheys (selityssaste 79 %)
- Bendtsen-ilmanläpäisevyys (selityssaste 93 %)

Näiden mallien keskihajonnat ja niitä vastaavat 95 %:n luottamusvälit ($n = 50$, $t_{5\%} = 2,01$):

ominaisuus	keskihajonta	95 %:n luottamusväli
vetoindeksi	1,4	$\pm 2,8 \text{ Nm/g}$
repäisyindeksi	0,24	$\pm 0,48 \text{ mNm}^2/\text{g}$
tiheys	10	$\pm 20 \text{ kg/m}^3$
ilmanläpäisevyys	14	$\pm 28 \text{ ml/min}$

Jokaisen ominaisuuden aineistossa on ainakin 2-4 haja-arvoa, jotka kasvattavat keskihajontaa ja siten suurentavat myös 95 %:n luottamusväliä eli huonontavat mallin luotettavuutta. Jos nämä haja-arvot poistetaan, keskihajonnat pienenevät huomattavasti.

Diplomityön koetulosten analysoinnin aikana selvisi, että mallit, joita eri ominaisuuksille voidaan muodostaa, näyttäisivät olevan hyvin massatyypikohtaisia. Muodostamalla oma malli esimerkiksi painelajittelun akseptille päästään mallin tarkkuudessa ja luotettavuudessa parempaan tulokseen kuin tapauksessa, jossa malli sisältää useita massatyyppejä. Käytännössä malli pitäisi muodostaa kullekin seurattavalle massatyypille erikseen.

Mekaanisten massojen rakenteellinen koostumus voidaan määritellä kahdella tekijällä: **kuitupituuden painojakaumalla** ja **ominaispartikkelimuotoparametrilla**, joka liittyy mekaanisen massan partikkelien sidospotentiaaliin.

On osoitettu, että arkin märkälujuus sekä kuivien arkkien, jotka on tehty hyvin erilaisista mekaanisista massoista, repäisy- ja puhkaisulujuus, katkeamispituus sekä ilmanläpäisevyys ovat lähes kokonaan riippuvaisia massan rakenteellisesta koostumuksesta. Lisäksi arkkien laatuarvoja on mahdollista estimoida vain kahden parametrin avulla.

Parametrit ovat **pituustekijä L**, joka määritellään 48 meshin viiralle jääneeksi prosenttiosuudeksi näytteen koko painosta, ja **muototekijä S**, joka on 48/100 fraktion hydrodynaaminen ominaispinta-ala. Canadian Standard Freeness-testi on ominaispinnan mitta, vaikkakin hienoainehäviöt freeness-laitteen sihtilevyn läpi vääristävätkin tuloksia.

Mekaanisen massan verkostolujuus riippuu lähinnä nauhamaisten ja säiemäisten soluseinän osasten määrästä massassa. Nämä osaset syntyvät trakeidin S_2 -kerroksen purkaantuessa, kun kuidussa olevat halkeamat kasvavat ja lisääntyvät. Purkaantumisprosessi on ilmeisesti hionta- tai hiertoprosessin toinen vaihe kuitujen erottumisen jälkeen.

Myös mekaanisen massan komponenttien partikkelien muodolla on tärkeä merkitys paperin lujuusominaisuuksiin. Hiokemassa, jolla on hyvät lujuusominaisuudet, sisältää tahmeaa tai limamaista hienoaainetta (kuituplasmaa tai lima-ainesta) kun taas hiokemassa, jolla on huonommat lujuusominaisuudet, sisältää jyvämäistä hienoaainetta (jauhoainesta).

Lisäksi on osoitettu, että parempi hienoaaine (kuituplasma) on yhteydessä pitkiin ja kapeisiin kuituihin, kun taas huonompi hienoaaine (jauhoaines) esiintyy yhdessä tikkuisen ja möhkälemäisen pitkäkuitufraktion kanssa.

Vaikka tehdyt tutkimukset koskevatkin lähinnä kivihioketta tai kuumahierrettä, voidaan tutkimusten tulosten olettaa olevan päteviä koskemaan myös painehioketta ja super-painehioketta. Kyse ei ole niinkään valmistusmenetelmästä vaan massoista, joilla on paperin valmistukseen hyvin soveltuvat massakomponentit ja hyvät lujuusominaisuudet.

Entistä tehokkaamman käytön- ja laaduntarkkailumenetelmän terve on ollut ajankohtainen jo kauan tehdashiomoissa lähinnä siitä syystä, että käytössä olevat menetelmät ovat olleet joko liiaksi aikaa vieviä tai ne ovat jättäneet toivomisen varaa niistä saatavien tietojen suhtaan. Forgacsin julkaistessa v. 1963 menetelmänsä se herätti aiheellista huomiota ja suurta mielenkiintoa. Menetelmä perustuu kahden perusluonteisen suureen, massan sidostenmuodostamiskyvyn ja massan kuitujen keskipituuden, määrittämiseen.

Massan ja paperin ominaisuuksia voidaan estimoida erilaisilla massasta tehtävillä tikku- ja kuitumittauksilla, joista perinteisimmät ovat Somerville-tikkupitoisuusmääritys ja Bauer-McNett -kuitulajittelu sekä uusimpia PQM - ja PulpExpert -on-line -laadunvalvontajärjestelmien suorittamat mittaukset. Nykyisillä on-line -mittausten avulla voidaan estimoida esim. laboratorioarkin lujuus- ja muita ominaisuuksia muutamassa minuutissa sekä tehdä johtopäätöksiä esim. hiomon ohjauksesta ja säädöstä.

Diplomityön kokeellisen osan tavoitteena oli tilastomatemaaattisin keinoin käyttäen lineaarista regressioanalyysiä selvittää, voidaanko massasulpun fysikaalisilla ominaisuuksilla estimoida valmiin laboratorioarkin ominaisuuksia. Fysikaalisilla ominaisuuksilla tarkoitetaan tässä yhteydessä PulpExpertin määrittämää massanäytteen kuitujen pituus- ja leveysjakaumaa. Kuidut jaettiin seitsemään pituus- ja viiteen leveysluokkaan.

Käyttämällä kuituanalyysin avulla määritetyn kuitujen pituus- ja leveysjakauman arvoja eli PE-luokkia, niiden avulla laskettua pituuspainotettua kuidunpituutta, PE-luokista tehtyjä muunnoksia, laboratoriofreenessia ja kaikkien näiden yhdistelmiä suoritettiin mallien muodostus.

Mallien selitysasteet liikkuivat 54 %:n ja 94 %:n välillä. Parhaat selitysasteet saavutettiin vetoindeksin, repäisyindeksin, Bendtsen-ilmanläpäisevyyden ja tiheyden malleille.

18 LÄHDELUETTELO

1. FORGACS, O.L., The characterization of mechanical pulps. Pulp and paper magazine of Canada 64(1963):convention issue, s. T89-T118.
2. PATERSON, H.A., Groundwood quality expressed by freeness and bursting strength. Pulp and paper magazine of Canada 37(1936):convention issue, s. 79-80, 126.
3. BRAUNS, O., The relation between freeness and strength of groundwood pulps. Svensk papperstidning 64(1961):18, s. 662-666.
4. JONES, H.W.H., The interdependence of properties in mechanical pulps. Pulp and paper magazine of Canada 63(1962):convention issue, s. T82-T86.
5. BARDSLEY, J.H., St. Lawrence rapid routine groundwood testing equipment. Pulp and paper magazine of Canada 53(1952):13, s. 92-97.
6. KRESS, O., BRAINERD, F.W., A study of wood pulp fractionation. Paper Trade Journal 98(1934):13, s. 35-39.
7. CLARK, J.d'A., The measurement and influence of fibre length. Technical association papers 1942:25, s. 556-562.
8. CLARK, J.d'A., Effects of fibre coarseness and length. I: Bulk, burst, tear, fold and tensile tests. Tappi 45(1962):8, s. 628-634.
9. CLARK, J.d'A., Components of the strength qualities of pulp. Tappi 56(1973):7, s. 122-125.
10. BRECHT, W., KLEMM, K.H., The mixture of structures in a mechanical pulp as a key to the knowledge of its technological properties. Pulp and paper magazine of Canada 54(1953):1, s. 72-80.

11. BRECHT, W., HOLL, M., Schaffung eines Normalverfahrens zur Gütebewertung von Holzschliffen. Der Papier-Fabrikant 37(1939):10, s. 74-88.
12. BRECHT, W., SCHANZ, D., Versuch zur Kennzeichnung von Holzschliff-Feinstoffen durch Ermittlung ihrer spezifischen Oberfläche. Wochenblatt für Papierfabrikation 85(1957):23, s. 891-898.
13. BRECHT, W., ERFURT, H., Neuere Untersuchungen über den Einfluß des Formcharakters von Holzschiff auf die Festigkeit von Schliffblättern. Wochenblatt für Papierfabrikation 89(1961):23/24, s. 1136-1140, 1142-1144.
14. DORLAND, R.M., HOLDER, D.A., LEASK, R.A., MCKINNEY, J.W., Mechanical pulp from chips, laboratory refining of softwood and hardwood species. Pulp and paper magazine of Canada 63(1962):2, s. T43-T52.
15. KCL:n sisäinen seloste.
16. KCL:n sisäinen seloste.
17. KCL:n sisäinen seloste.
18. KCL:n sisäinen seloste.
19. YLIKOSKI, J., Kuidunpinnan ominaisuuksien ja fibrilloitumisen määrittäminen konfokaalisella laserpyyhkäisymikroskoopilla. Diplomityö. Helsingin teknillinen korkeakoulu, puunjalostustekniikan laitos. Espoo 1992. 108 s.
20. KCL:n sisäinen seloste.
21. KCL:n sisäinen seloste.
22. ANDERSSON, O., An investigation of the Hillbom and Bauer-McNett fibre classifiers. Svensk papperstidning 56(1953):18, s. 704-709.

23. THODE, E.F., BEAMESDERFER, J.W., CHASE, A.J., Dye adsorption on wood pulp II. Relation of dye adsorption to physical properties of beaten sulphite pulp. Tappi 35(1952):8, s. 379-384.
24. SZWARCZTAJN, E., PRZYBYSZ, K., External fibrillation of beaten cellulose fibres. Cellulose Chemistry and Technology 6(1972), s. 223-238.
25. MASON, S.G., The specific surface of fibres - its measurement and application. Tappi 33(1950):8, s. 403-409.
26. EMERTON, R.W., The specific external surface of fibre - some theoretical considerations. Pulp and paper magazine of Canada 56(1955):2, s. 65-68.
27. THODE, E.F., INGMANSON, W.L., Factors contributing to the strength of a sheet of paper. I. External specific surface and swollen specific volume. Tappi 42(1959):1, s. 74-83.
28. ROBERTSON, A.A., MASON, S.G., Specific surface of cellulose fibres by the liquid permeability method. Pulp and paper magazine of Canada 50(1949):13, s. 103-110.
29. INGMANSON, W.L., An investigation of the mechanism of water removal from pulp slurries. Tappi 35(1952):10, s. 439-448.
30. INGMANSON, W.L., WHITNEY, R.P., The filtration resistance of pulp slurries. Tappi 37(1954):11, s. 523-533.
31. CAMPBELL, W.B., The physics of water removal. Pulp and paper magazine of Canada. 48(1947):convention issue, s. 103-109, 122.

32. MANNSTRÖM, B., On the characterization and quality of mechanical pulp. Paperi ja Puu 1967:erikoisnumero 4a, s. 137-146.
33. FRAZER, F.W., Determination of groundwood strength by drainage resistance tests. Appita 31(1977):3, s. 209-213.
34. ULLMAN, U., BILLING, O., Fiberfraktionering som massakaraktereringsmetod. Svensk papperstidning 68(1965):7, s. 230-246.
35. KCL:n sisäinen seloste.
36. Determination of the shive content of groundwood pulp. Second report of the pulp evaluation committee to the technical section. Julk. Technical section of the Paper Makers' Association of Great Britain & Ireland. Lontoo 1936.
37. Kaukas Oy:n työohje.
38. SCAN-M 13:83 Mekaaninen massa - Tikkuisuus - PFI:n minitikkuseula. Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing Committee, 1983. 4 s.
39. KCL:n sisäinen seloste.
40. Pulmac-tikkuanalysointilaitteen ohjekirja.
41. Kaukas Oy:n analyysiohje.
42. Tellusond STFI 3000 L:n käyttöohje.
43. NORDMAN, L., PQM - järjestelmä massan laadun tarkkailuun. Paperi ja Puu 71(1989):5, s. 484-485.

44. NORDIN, J., JACKSON, M., SKÖLD, H., LAROSE, J-P., Continuous on-line measurement of pulp quality. Technical section of Canadian Pulp and Paper Association 77th Annual meeting. Montreal, Québec, January 29 and 30, 1991. S. A139-A150.
45. PulpExpert-esite.
46. PulpExpert-käyttöohje.
47. BICHARD, W., SCUDAMORE, P., An evaluation of the comparative performance of the Kajaani FS-100 and FS-200 fiber length analyzers. Tappi Journal 71(1988):12, s. 111-120.
48. LUUKKONEN, M., SUUTARI, H., PAAVILAINEN, L., Utilization of pulp drainage and fibre length measurements at a TMP mill. Appita Journal 43(1990):3, s. 213-216.
49. SCAN-M6:69 Mekaanisen massan kuitujen lajittelu McNettin laitteella. Scandinavian Pulp, Paper and Board Testing Committee, 1969. 3 s.
50. KCL:n sisäinen seloste.
51. LEVLIN, J-E., On the suitability of the McNett classifier for the fibre-length classification of pulps. Paperi ja Puu 64(1982):4, s. 213-216, 236.
52. STRAND, B.C., MOKVIST, A., On-line control and optimization of the refining process using a model based control system. Tappi Proceedings 1991 International Mechanical Pulping Conference. S. 101-108.
53. STRAND, B.C., MOKVIST, A., FERRITSIUS, O., SKÖLD, H., JÄMTE, J., On-line prediction of mechanical pulp strength and optical properties. Journal of Pulp and Paper Science 18(1992):5, s. J176-J181.

54. PAULAPURO, H., Prediction of quality parameters of groundwood pulp mixtures. Paperi ja Puu 59(1977):4, s. 297-307.
55. LEHTO, J., Paine- ja tuotantonopeussäätötapojen soveltuvuus hiomakoneen ohjaukseen. Diplomityö. Helsingin teknillinen korkeakoulu, puunjalostusosasto. Espoo 1980. 109 s.

LIITELUETTELO

Liite 1 Laboratoriomäärittelyksiin käytetyt standardit

Liite 2 Laboratorion mittaustulokset

Liite 3 Regressioanalyysien tulokset eri ominaisuuksille

Liite 4 Parhaat mallien selityssasteet prosentteina eri massa- ja arkkiominaisuuksille eri selittäjäyhdistelmillä

Liite 5 Regressioanalyysin graafiset tulokset veto- ja repäisyindeksille, tiheydelle sekä ilmanläpäisevyydelle

Liite 6 Mallinmuodostuksen päätöksentekoperusteet

Liite 1 Laboratoriomäärityksiin käytetyt standardit

Sakeus	SCAN-C 17:64
Freeness	SCAN-C 21:65
Bauer-McNett -kuitulajittelu	SCAN-M 6:69
Laboratorioarkkien valmistus	SCAN-C 26
Märkäpuristus	320 kPa / 2 x 2,5 min.
Kuivaus	Rumpukuivaus, sisälämpötila 120 °C / 2 tuntia
Neliömassa	SCAN-P 6:75
Vetoindeksi	SCAN-P 38:80
Repäisyindeksi	SCAN-P 11:73
Paksuus	SCAN-P 7:75
Karheus	SCAN-P 21:67
Ilmanläpäisevyys	SCAN-P 21:67
Vaaleus	SCAN-G 1:75
Valonsirontakerroin	SCAN-G 1:75
Opasiteetti	SCAN-G 1:75

Liite 2 Laboratorion mittaustulokset

PASI NISSISEN DI-TYÖ

Painelajittelun aksepti

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	11.12 1992 15.00	14.12 1992 13.00	17.12 1992	18.12 1992 11.00	14.01 1993 9.25	15.01 1993	19.01 1993 10.30	20.01 1993 10.30	22.01 1993 6.55	22.01 1993 10.20	26.01 1993 6.50	28.01 1993 6.50	01.02 1993 17.45	04.02 1993 6.50	09.02 1993 10.05	11.02 1993 6.50	16.02 1993 10.45	18.02 1993 7.00	22.02 1993 16.15	25.02 1993 6.55
Sakeus	%	0.95	0.97	0.96	1.01	0.99	0.93	0.97	0.99	0.89	0.93	0.99	0.97	0.94	0.96	0.94	0.94	0.92	0.98	0.93
Freeness	ml	75	86	89	108	116	89	87	104	82	118	96	99	87	91	98	97	79	92	105
Pulmac (5g)	%	2.76	2.14	2.60	1.88	2.18	1.46	1.68	2.70	2.14	1.50	2.60	1.98	1.64	1.66	1.30	1.72	1.34	0.92	0.96
Bauer Mc Nett 30	%	23.8	27.7	23.2	22.4	24.3	22.7	23.1	25.5	30.0	22.2	23.0	22.6	21.2	22.6	21.5	23.6	20.3	19.3	19.9
	%	17.2	17.5	17.1	18.3	17.2	17.7	17.9	17.2	17.2	18.9	17.7	18.7	18.2	17.3	18.3	18.3	18.0	18.3	19.3
	%	15.2	15.0	16.2	17.1	17.8	17.6	17.9	17.2	15.8	19.8	18.2	17.3	18.3	18.1	18.7	18.0	18.3	19.2	19.1
	%	13.0	12.2	13.5	14.2	12.9	12.5	12.7	11.9	10.8	13.2	12.6	12.8	13.0	12.4	12.5	12.0	11.8	13.1	13.4
	%	30.8	27.6	30.0	28.0	30.0	29.5	28.4	28.2	26.2	25.9	28.5	28.6	29.3	29.6	29.0	28.1	31.6	30.1	28.3
Bauer Mc Nett kuittuplt. mm	mm	0.869	0.933	0.863	0.868	0.866	0.866	0.877	0.904	0.969	0.882	0.874	0.874	0.851	0.863	0.858	0.888	0.832	0.826	0.845
FS-200 kuittupltuus mm	mm	0.94	0.85	0.88	0.88	0.92	0.87	0.87	0.85	0.85	0.82	0.84	0.85	0.81	0.82	0.86	0.82	0.81	0.80	0.82
FS-200 pituusmassa mg/m	mg/m	0.28	0.27	0.25	0.25	0.27	0.27	0.26	0.27	0.26	0.26									
Tellusond 1-16 kpl/g	kpl/g	2227	2065	1979	1999	2198	2107	2095	2377	2176	1894	2071	1598	1477	1750	1680	1763	1314	1254	1166
Tellusond 5-16 kpl/g	kpl/g	84	81	67	70	90	72	82	113	84	52	75	34	29	51	58	43	21	42	16
Tellusond kuittuluku kpl/g	kpl/g	84600	84200	82900	83700	85800	87300	87200	88600	85200	87500	87100	83900	81200	84800	84800	85300	79700	79900	81200
Tellusond tikku-%	%	2.63	2.45	2.39	2.39	2.56	2.41	2.40	2.68	2.55	2.16	2.38	1.90	1.82	2.07	1.98	2.07	1.65	1.57	1.44
Nelto massa g/m²	g/m²	102.2	100.0	100.9	100.4	102.4	99.6	100.1	98.5	97.8	97.6	100.8	102.2	100.1	100.7	99.2	102.0	103.0	105.7	103.4
Vetoindeksi Nm/g	Nm/g	33.4	34.9	33.8	31.5	32.5	34.9	34.2	31.2	33.5	28.6	32.3	31.5	33.2	32.1	31.2	31.6	31.0	29.2	27.6
Repäisyindeksi mNm²/g	mNm²/g	4.72	4.39	4.86	4.41	5.07	4.51	4.75	5.08	4.98	4.30	4.85	4.31	4.46	4.56	4.63	4.91	4.45	4.30	3.98
Tiheys kg/m³	kg/m³	391	387	396	391	376	390	396	376	393	373	394	386	394	390	384	390	407	392	381
Bulkk1 cm³/g	cm³/g	2.56	2.59	2.53	2.56	2.66	2.56	2.52	2.66	2.54	2.68	2.54	2.59	2.54	2.57	2.61	2.56	2.50	2.55	2.63
Karheus 1 kp yp ml/min	ml/min	1368	1371	1309	1283	1395	1398	1407	1514	1449	1415	1361	1353	1359	1394	1358	1375	1335	1348	1372
Karheus 1 kp vp ml/min	ml/min	1562	1607	1680	1587	1532	1501	1412	1527	1499	1481	1417	1426	1355	1490	1465	1403	1401	1387	1378
Karheus 5 kp yp ml/min	ml/min	600	627	545	541	597	605	569	635	616	586	571	544	552	573	533	576	521	520	550
Karheus 5 kp vp ml/min	ml/min	709	770	815	735	658	644	592	648	623	632	571	549	545	653	598	563	603	546	548
Bendtsen huok. ml/min	ml/min	169	196	188	188	222	188	177	245	179	313	203	222	188	199	219	220	174	218	279
Vaaheus yp %	%	64.4	65.7	65.1	65.6	65.8	66.5	65.9	65.6	65.8	65.5	65.2	66.0	66.8	65.0	65.2	66.9	66.8	67.5	66.5
Vaaheus vp %	%	64.5	66.0	65.3	65.7	66.1	66.6	66.0	65.8	65.9	65.7	65.4	66.1	66.9	65.1	65.5	67.0	66.9	67.6	66.6
Valonsirontak. yp m²/kg	m²/kg	70.7	71.1	69.0	70.1	70.9	69.8	72.7	69.9	71.8	68.2	70.3	71.9	73.7	71.9	72.2	72.3	71.1	71.1	69.0
Valonsirontak. vp m²/kg	m²/kg	70.9	70.9	69.3	70.1	71.2	72.3	72.6	69.8	71.6	68.8	70.2	72.1	74.0	73.0	73.5	72.6	72.0	71.1	68.7
Opasiteetti yp %	%	98.9	98.6	98.6	98.6	98.7	98.4	98.6	98.4	98.4	98.2	98.6	98.6	98.5	98.7	98.6	98.4	98.4	98.4	98.4
Opasiteetti vp %	%	98.9	98.5	98.6	98.6	98.6	98.4	98.6	98.4	98.4	98.2	98.6	98.7	98.5	98.8	98.7	98.4	98.5	98.5	98.4

PASI NISSISEN DI-TYÖ

Rejekttilinjan aksepti

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	11.12 1992 15.00	14.12 1992 13.00	17.12 1992	18.12 1992 11.00	14.01 1993 9.25	15.01 1993	19.01 1993 10.30	20.01 1993 10.30	22.01 1993 6.55	22.01 1993 10.20	26.01 1993 6.50	28.01 1993 6.50	01.02 1993 17.45	04.02 1993 6.50	09.02 1993 10.05	11.02 1993 6.50	16.02 1993 10.45	18.02 1993 7.00	22.02 1993 16.15	25.02 1993 6.55
Sakeus	0.74	0.81	0.80	0.79	0.81	0.80	0.68	0.78	0.80	0.77	0.79	0.78	0.82	0.80	0.80	0.81	0.81	0.74	0.81	0.84
Freeness	73	72	79	66	80	83	61	59	72	58	64	60	85	77	85	87	83	73	89	105
Pulmac (5g)	1.10	0.84	1.14	0.80	0.68	1.04	0.82	0.74	1.46	0.82	0.58	0.70	1.02	0.76	0.90	0.90	1.24	1.08	0.70	0.64
Bauer Mc Nett 30	29.5	21.5	26.4	23.6	27.1	28.1	24.7	24.9	23.5	26.7	25.2	19.3	32.1	26.5	29.9	28.9	31.2	33.5	28.6	27.1
50	15.8	18.0	15.7	17.1	17.7	17.6	17.1	16.7	17.3	16.3	17.1	18.4	18.9	21.3	17.6	18.1	19.8	20.3	17.2	18.7
100	12.9	16.5	13.6	14.8	15.7	15.5	16.0	15.5	17.4	15.6	16.8	17.8	16.5	18.8	16.2	16.4	17.3	17.8	15.7	16.5
200	11.0	13.5	11.5	12.3	11.7	11.5	11.0	11.3	12.0	10.5	11.5	11.5	11.3	12.0	11.0	11.0	11.0	11.2	10.5	11.4
<200	30.8	30.5	32.8	32.2	27.8	27.3	31.2	31.6	29.8	30.9	29.4	33.0	21.2	21.4	25.3	25.6	20.7	17.2	28.0	26.3
Bauer Mc Nett kuitupit. mm	0.934	0.846	0.886	0.861	0.928	0.942	0.883	0.880	0.874	0.905	0.896	0.817	1.025	0.970	0.974	0.964	1.023	1.068	0.946	0.942
FS-200 kuldunpituus mm	1.09	1.00	1.01	0.96	1.02	0.99	0.94	0.96	0.99	1.02	0.90	0.86	0.99	0.91	0.98	1.03	0.98	1.03	1.00	1.00
FS-200 pituusmassa mg/m	0.27	0.23	0.25	0.24	0.24	0.24	0.25	0.25	0.24	0.24	0.24									
Tellusond 1-16 kpl/g	1331	1138	1291	924	1151	1248	947	1000	1379	964	955	586	1466	994	1383	1371	1590	1739	1219	1048
Tellusond 5-16 kpl/g	45	33	50	24	38	45	27	26	55	28	36	15	51	15	51	37	46	32	45	24
Tellusond kuituluku kpl/g	75900	76600	71600	65700	76900	77400	67400	70000	76600	71000	76000	58500	84400	79300	79700	81100	85300	92300	76800	77700
Tellusond tikku- $\%$	1.75	1.49	1.80	1.41	1.50	1.61	1.41	1.43	1.80	1.36	1.35	1.00	1.74	1.25	1.74	1.69	1.86	1.88	1.59	1.35
Neliömassa g/m ²	99.2	100.9	100.7	102.1	98.8	98.6	98.9	99.4	99.8	97.8	100.7	100.5	100.8	102.0	99.5	97.3	100.0	104.7	101.3	99.8
Vetoindeksi Nm/g	41.7	43.9	37.6	40.5	42.0	39.8	40.8	43.2	42.1	44.0	42.3	38.8	42.3	36.5	40.0	39.7	41.3	40.3	37.1	36.5
Repälsyindeksi mNm ² /g	6.63	6.50	6.14	5.65	6.33	6.08	6.00	5.76	6.41	6.22	6.16	5.23	6.61	5.79	6.31	6.23	6.35	6.26	5.81	5.87
Tiheys kg/m ³	439	424	433	440	406	412	438	445	412	446	432	451	403	403	408	400	399	412	426	416
Bulkki cm ³ /g	2.28	2.36	2.31	2.27	2.46	2.43	2.28	2.25	2.42	2.24	2.31	2.22	2.48	2.48	2.45	2.50	2.51	2.42	2.35	2.41
Karheus 1 kp yp ml/min	1650	1541	1446	1382	1480	1471	1385	1475	1600	1461	1477	1398	1394	1454	1493	1506	1492	1492	1448	1421
Karheus 1 kp vp ml/min	1755	1658	1959	1850	2075	1714	1619	1547	1731	1564	1553	1479	1504	1509	1609	1529	1540	1550	1563	1524
Karheus 5 kp yp ml/min	772	711	634	570	619	611	595	630	685	619	583	601	569	578	620	646	649	631	588	637
Karheus 5 kp vp ml/min	868	807	1049	940	996	787	740	674	842	700	685	676	648	625	750	698	701	651	668	687
Bendtsen huok. ml/min	99	107	129	103	123	136	96	91	128	87	104	107	142	147	150	143	172	139	160	201
Vaaleus yp $\%$	64.1	65.6	64.6	64.9	65.2	65.1	65.9	65.6	65.4	65.9	65.4	65.0	65.4	67.6	64.5	64.8	66.3	66.1	66.8	65.8
Vaaleus vp $\%$	64.6	65.6	65.0	65.3	65.6	65.4	66.2	65.8	65.6	65.9	65.6	65.3	65.5	67.6	64.8	65.1	66.5	66.4	67.2	66.1
Valonsirontak. yp m ² /kg	63.4	64.6	63.4	64.7	66.3	64.8	68.0	67.1	64.8	66.9	66.3	66.5	63.8	67.5	64.3	65.2	64.0	63.4	62.8	61.6
Valonsirontak. vp m ² /kg	63.9	64.6	64.5	65.5	67.0	65.9	68.2	66.8	65.1	66.6	66.7	67.4	64.5	68.1	65.4	66.9	64.0	63.9	63.7	61.7
Opasiteetti yp $\%$	98.5	98.4	98.5	98.6	98.3	98.3	98.5	98.6	98.3	98.4	98.6	98.7	98.1	97.9	98.3	98.2	97.8	98.2	98.0	97.9
Opasiteetti vp $\%$	98.5	98.4	98.6	98.7	98.3	98.3	98.5	98.6	98.3	98.4	98.6	98.8	98.2	98.0	98.4	98.3	97.8	98.2	98.1	97.9

Liite 3 Regressioanalyysien tulokset eri ominaisuuksille

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF PULMAC

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	3.41824	1.01005	3.38	0.0016	
CSFL	0.01428	0.00386	3.70	0.0006	1.2
L1P4	-0.41060	0.07449	-5.51	0.0000	1.4
L2P4	0.52701	0.12425	4.24	0.0001	1.4
L2P5	0.27622	0.15203	1.82	0.0765	1.3
L2P6	-0.21474	0.13299	-1.61	0.1141	1.3
L3P6	1.69095	1.11662	1.51	0.1376	1.2
L3P7	2.76179	1.35682	2.04	0.0483	1.1
L4P6	7.39395	2.74900	2.69	0.0103	1.2

R-SQUARED	0.7130	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	0.11676
ADJUSTED R-SQUARED	0.6570	STANDARD DEVIATION	0.34171

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	8	11.8953	1.48691	12.73	0.0000
RESIDUAL	41	4.78728	0.11676		
TOTAL	49	16.6826			

CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF PULMAC

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	3.94983	0.98758	4.00	0.0002	
CSFL	0.01434	0.00383	3.74	0.0005	1.1
L1P4	-0.43798	0.07386	-5.93	0.0000	1.3
L2P4	0.53746	0.12434	4.32	0.0001	1.3
L3P7	3.01716	1.38624	2.18	0.0349	1.0
L4P6	7.68556	2.71690	2.83	0.0070	1.1

R-SQUARED	0.6696	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	0.12527
ADJUSTED R-SQUARED	0.6321	STANDARD DEVIATION	0.35394

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	5	11.1707	2.23414	17.83	0.0000
RESIDUAL	44	5.51192	0.12527		
TOTAL	49	16.6826			

CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF R30

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	64.7392	14.9884	4.32	0.0001	
L1P6	2.27744	0.38672	5.89	0.0000	4.3
L2P2	0.82965	0.76974	1.08	0.2881	4.4
L3P7	13.5570	7.87731	1.72	0.0936	1.3
NJL1P1	-6.74588	1.97868	-3.41	0.0016	3.1
NJL1P5	-17.3061	3.82585	-4.52	0.0001	6.1
NJL2P4	3.59674	2.90573	1.24	0.2236	1.8
NJL2P5	10.6286	3.27173	3.25	0.0025	2.1
NJL2P7	5.49270	1.68738	3.26	0.0024	1.7
NJL3P2	-12.4555	6.18851	-2.01	0.0515	3.8
NJL3P3	-5.79417	3.62792	-1.60	0.1187	1.8
NJL3P6	3.81371	2.03937	1.87	0.0694	1.3
NJL4P3	6.36206	2.77152	2.30	0.0275	1.5

R-SQUARED	0.7901	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	3.22219
ADJUSTED R-SQUARED	0.7220	STANDARD DEVIATION	1.79505

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	12	448.674	37.3895	11.60	0.0000
RESIDUAL	37	119.221	3.22219		
TOTAL	49	567.895			

CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF R30

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	20.8446	6.96615	2.99	0.0045	
L1P6	2.43170	0.38476	6.32	0.0000	3.3
NJL1P5	-10.8982	3.51653	-3.10	0.0033	4.0
NJL2P5	7.24900	3.02339	2.40	0.0207	1.3
NJL2P7	4.03313	1.77646	2.27	0.0280	1.5

R-SQUARED0.6665RESID. MEAN SQUARE (MSE)4.20846

ADJUSTED R-SQUARED0.6369STANDARD DEVIATION2.05145

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	4	378.515	94.6287	22.49	0.0000
RESIDUAL	45	189.380	4.20846		
TOTAL	49	567.895			

CASES INCLUDED 50

MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF R50

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	-10.9575	4.45817	-2.46	0.0183	
L1P4	0.92234	0.14360	6.42	0.0000	1.4
L3P3	-2.17024	0.87653	-2.48	0.0175	1.7
L3P5	4.52853	1.37976	3.28	0.0021	1.5
L4P5	-27.0136	7.42457	-3.64	0.0008	3.5
L4P6	34.8335	9.06857	3.84	0.0004	3.6
NJL1P3	4.00572	0.90030	4.45	0.0001	1.2
NJL2P4	-1.63618	0.98537	-1.66	0.1045	1.5
NJL3P2	2.28268	1.43593	1.59	0.1196	1.5

R-SQUARED0.6681RESID. MEAN SQUARE (MSE)0.44177

ADJUSTED R-SQUARED0.6034STANDARD DEVIATION0.66466

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	8	36.4628	4.55784	10.32	0.0000
RESIDUAL	41	18.1124	0.44177		
TOTAL	49	54.5752			

CASES INCLUDED 50

MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF R50

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	-10.5861	4.29903	-2.46	0.0179	
L1P4	0.83184	0.13651	6.09	0.0000	1.2
L3P3	-2.00225	0.78598	-2.55	0.0145	1.3
L3P5	4.43343	1.41223	3.14	0.0031	1.4
L4P5	-25.9570	7.56245	-3.43	0.0013	3.5
L4P6	31.8180	9.08882	3.50	0.0011	3.4
NJL1P3	4.14371	0.91837	4.51	0.0000	1.1

R-SQUARED	0.6349	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	0.46340
ADJUSTED R-SQUARED	0.5839	STANDARD DEVIATION	0.68073

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	6	34.6491	5.77486	12.46	0.0000
RESIDUAL	43	19.9261	0.46340		
TOTAL	49	54.5752			

CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF R100

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	-16.2741	7.82887	-2.08	0.0438	
NJL1P3	5.72136	1.25914	4.54	0.0000	1.8
NJL1P4	4.18757	1.22313	3.42	0.0014	1.5
NJL1P6	-2.61486	0.68975	-3.79	0.0005	2.4
NJL2P1	-4.01407	1.83014	-2.19	0.0339	3.5
NJL3P1	3.39125	2.22158	1.53	0.1344	3.3
NJL3P2	6.50305	2.27370	2.86	0.0066	2.9
NJL4P2	-5.67009	2.07347	-2.73	0.0091	1.5

R-SQUARED	0.7748	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	0.55952
ADJUSTED R-SQUARED	0.7372	STANDARD DEVIATION	0.74801

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	7	80.8341	11.5477	20.64	0.0000
RESIDUAL	42	23.4997	0.55952		
TOTAL	49	104.334			

CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF R100

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	-26.2791	6.12408	-4.29	0.0001	
NJL1P3	6.62365	1.17531	5.64	0.0000	1.5
NJL1P4	4.91437	1.21548	4.04	0.0002	1.4
NJL1P6	-2.18538	0.61815	-3.54	0.0010	1.8
NJL3P2	5.98151	1.67860	3.56	0.0009	1.5
NJL4P2	-6.35497	2.11554	-3.00	0.0044	1.5

R-SQUARED	0.7479	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	0.59779
ADJUSTED R-SQUARED	0.7192	STANDARD DEVIATION	0.77317

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	5	78.0308	15.6062	26.11	0.0000
RESIDUAL	44	26.3030	0.59779		
TOTAL	49	104.334			

CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF R200

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	-2.48792	3.99482	-0.62	0.5376	
CSFL	0.01384	0.00701	1.97	0.0565	1.9
L1P1	0.20811	0.07216	2.88	0.0068	3.2
L2P3	0.61644	0.27570	2.24	0.0320	3.6
L3P3	-2.20195	0.73837	-2.98	0.0053	2.2
L4P5	-18.4598	6.29604	-2.93	0.0060	4.5
L4P6	29.4495	8.10561	3.63	0.0009	5.1
NJL1P5	4.63005	1.21364	3.82	0.0005	8.1
NJL1P7	-1.47150	0.35478	-4.15	0.0002	2.8
NJL2P4	1.32564	0.90185	1.47	0.1508	2.3
NJL2P5	-1.04981	0.94141	-1.12	0.2726	2.2
NJL2P6	-2.48130	0.80094	-3.10	0.0039	2.3
NJL3P2	1.79958	1.27698	1.41	0.1678	2.1
NJL3P5	0.74387	0.45047	1.65	0.1079	1.4
NJL3P6	0.62100	0.58083	1.07	0.2925	1.4
NJL4P2	-2.76956	1.65392	-1.67	0.1032	2.2

R-SQUARED	0.7683	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	0.24586
ADJUSTED R-SQUARED	0.6661	STANDARD DEVIATION	0.49585

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	15	27.7206	1.84804	7.52	0.0000
RESIDUAL	34	8.35939	0.24586		
TOTAL	49	36.0800			

CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF R200

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	-0.20606	3.75838	-0.05	0.9565	.
CSFL	0.01470	0.00669	2.20	0.0338	1.5
L1P1	0.20862	0.06420	3.25	0.0023	2.2
L2P3	0.78852	0.23629	3.34	0.0018	2.3
L3P3	-1.84640	0.68760	-2.69	0.0105	1.6
L4P5	-19.7596	6.19715	-3.19	0.0028	3.8
L4P6	29.4514	8.42762	3.49	0.0012	4.8
NJL1P5	4.05397	1.06120	3.82	0.0005	5.4
NJL1P7	-1.41524	0.37240	-3.80	0.0005	2.7
NJL2P6	-2.76782	0.82486	-3.36	0.0017	2.1

R-SQUARED	0.6866	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	0.28266
ADJUSTED R-SQUARED	0.6161	STANDARD DEVIATION	0.53166

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	9	24.7737	2.75263	9.74	0.0000
RESIDUAL	40	11.3063	0.28266		
TOTAL	49	36.0800			

CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF P200

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	379.123	87.8971	4.31	0.0001	
CSFL	-0.04432	0.03348	-1.32	0.1933	1.5
L1P1	-2.21321	0.81334	-2.72	0.0097	14.0
L1P2	-2.73339	0.81221	-3.37	0.0017	18.6
L1P4	-4.41403	1.17795	-3.75	0.0006	5.8
L1P6	-5.08050	1.23650	-4.11	0.0002	19.7
L3P5	-8.13740	5.12095	-1.59	0.1201	1.2
L3P7	-21.3947	11.0032	-1.94	0.0591	1.1
NJL1P3	-25.5990	7.12218	-3.59	0.0009	4.4
NJL1P7	-4.73803	3.77774	-1.25	0.2172	11.0
NJL2P7	-5.67909	3.58363	-1.58	0.1211	3.5

R-SQUARED	0.5904	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	7.23309
ADJUSTED R-SQUARED	0.4853	STANDARD DEVIATION	2.68944

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	10	406.539	40.6539	5.62	0.0000
RESIDUAL	39	282.090	7.23309		
TOTAL	49	688.630			

CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF P200

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	348.164	66.9879	5.20	0.0000	
L1P1	-1.93357	0.67066	-2.88	0.0061	8.8
L1P2	-2.47815	0.65063	-3.81	0.0004	11.1
L1P4	-4.13273	1.05800	-3.91	0.0003	4.3
L1P6	-4.92388	1.15119	-4.28	0.0001	15.8
NJL1P3	-24.4547	5.69290	-4.30	0.0001	2.6
NJL2P7	-10.1528	3.05292	-3.33	0.0018	2.3

R-SQUARED	0.5126	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	7.80542
ADJUSTED R-SQUARED	0.4446	STANDARD DEVIATION	2.79382

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	6	352.997	58.8328	7.54	0.0000
RESIDUAL	43	335.633	7.80542		
TOTAL	49	688.630			

CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF VETO

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	38.4071	8.60909	4.46	0.0001	
CSFL	-0.10700	0.01631	-6.56	0.0000	1.5
PEKP	-80.5762	23.5783	-3.42	0.0016	111.9
L1P4	1.58677	0.43316	3.66	0.0008	3.4
L1P5	0.96379	0.64653	1.49	0.1445	11.3
L1P6	3.08135	0.59259	5.20	0.0000	19.4
L1P7	4.55654	0.84660	5.38	0.0000	26.2
L2P1	1.16668	0.84516	1.38	0.1757	3.2
L2P5	2.36032	0.71047	3.32	0.0020	1.9
L2P7	-2.21702	0.91740	-2.42	0.0207	3.1
L3P2	2.68257	1.39901	1.92	0.0629	2.5
L3P3	-2.96454	1.56870	-1.89	0.0666	1.4
L3P7	19.8332	5.43250	3.65	0.0008	1.2

R-SQUARED	0.9423	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	1.68431
ADJUSTED R-SQUARED	0.9236	STANDARD DEVIATION	1.29781

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	12	1018.35	84.8627	50.38	0.0000
RESIDUAL	37	62.3195	1.68431		
TOTAL	49	1080.67			

CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF VETO

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	29.4502	7.64271	3.85	0.0004	
CSFL	-0.11056	0.01714	-6.45	0.0000	1.4
PEKP	-55.0492	17.1528	-3.21	0.0026	51.7
L1P4	1.61301	0.41822	3.86	0.0004	2.7
L1P6	2.82548	0.55684	5.07	0.0000	15.0
L1P7	3.20447	0.68787	4.66	0.0000	15.1
L2P1	2.07287	0.66981	3.09	0.0036	1.7
L2P5	2.27069	0.63429	3.58	0.0009	1.3
L3P3	-3.52430	1.52650	-2.31	0.0262	1.2
L3P7	17.5638	5.62047	3.12	0.0033	1.1

R-SQUARED	0.9285	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	1.93048
ADJUSTED R-SQUARED	0.9125	STANDARD DEVIATION	1.38942

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	9	1003.45	111.495	57.75	0.0000
RESIDUAL	40	77.2193	1.93048		
TOTAL	49	1080.67			

CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF REP

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	7.60211	3.23043	2.35	0.0237	
CSFL	-0.00610	0.00279	-2.19	0.0349	1.4
L1P6	0.13140	0.05767	2.28	0.0283	6.1
L1P7	0.36522	0.07286	5.01	0.0000	6.4
L2P5	0.55511	0.10345	5.37	0.0000	1.3
L2P7	-0.26445	0.15051	-1.76	0.0868	2.8
NJL1P2	-0.87660	0.49061	-1.79	0.0818	7.7
NJL3P3	-0.44620	0.37029	-1.21	0.2355	1.2
NJL3P5	0.45669	0.20594	2.22	0.0325	1.4
NJL3P6	0.26033	0.23884	1.09	0.2824	1.1
NJL4P5	-1.66565	0.47701	-3.49	0.0012	1.3

R-SQUARED	0.9349	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	0.05113
ADJUSTED R-SQUARED	0.9182	STANDARD DEVIATION	0.22613

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	10	28.6431	2.86431	56.02	0.0000
RESIDUAL	39	1.99419	0.05113		
TOTAL	49	30.6373			

CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF REP

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	1.86029	0.42759	4.35	0.0001	
CSFL	-0.00725	0.00292	-2.48	0.0171	1.4
L1P6	0.20884	0.04464	4.68	0.0000	3.2
L1P7	0.32422	0.05744	5.64	0.0000	3.5
L2P5	0.52772	0.10233	5.16	0.0000	1.2
NJL4P5	-1.23091	0.47540	-2.59	0.0130	1.1

R-SQUARED	0.9177	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	0.05730
ADJUSTED R-SQUARED	0.9084	STANDARD DEVIATION	0.23937

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	5	28.1161	5.62321	98.14	0.0000
RESIDUAL	44	2.52121	0.05730		
TOTAL	49	30.6373			

CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF TIHEYS

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	389.202	42.4363	9.17	0.0000	
CSFL	-0.98038	0.11066	-8.86	0.0000	1.4
L1P1	2.28039	1.11456	2.05	0.0474	2.3
L1P5	8.86996	2.66131	3.33	0.0019	4.0
L2P7	-14.1362	6.28637	-2.25	0.0301	3.1
L3P5	-46.4759	17.0839	-2.72	0.0096	1.2
L3P6	-44.6952	28.9928	-1.54	0.1310	1.2
NJL1P7	19.1028	8.16496	2.34	0.0244	4.6
NJL2P6	-28.5253	12.1738	-2.34	0.0242	1.6
NJL4P2	24.1382	22.2155	1.09	0.2837	1.2

R-SQUARED	0.8390	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	81.1852
ADJUSTED R-SQUARED	0.8028	STANDARD DEVIATION	9.01029

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	9	16922.5	1880.28	23.16	0.0000
RESIDUAL	40	3247.41	81.1852		
TOTAL	49	20169.9			

CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF TIHEYS

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	453.197	19.3436	23.43	0.0000	
CSFL	-1.06858	0.10822	-9.87	0.0000	1.2
L1P5	5.43717	1.58381	3.43	0.0013	1.2
L3P5	-59.5743	17.2505	-3.45	0.0012	1.1

R-SQUARED0.7872

ADJUSTED R-SQUARED0.7733

RESID. MEAN SQUARE (MSE)93.3284

STANDARD DEVIATION9.66066

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	3	15876.8	5292.27	56.71	0.0000
RESIDUAL	46	4293.11	93.3284		
TOTAL	49	20169.9			

CASES INCLUDED 50

MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF KARH5

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	-1012.84	309.565	-3.27	0.0023	
CSFL	0.98533	0.57305	1.72	0.0939	1.5
L1P1	36.0000	6.32589	5.69	0.0000	3.0
L1P5	33.5227	17.5136	1.91	0.0634	6.8
L1P6	26.1812	10.8163	2.42	0.0205	5.3
L1P7	49.4519	14.1788	3.49	0.0013	6.0
L2P2	27.6455	16.3707	1.69	0.0997	3.1
L2P5	27.4730	26.4175	1.04	0.3051	2.2
L2P7	-78.7220	31.1801	-2.52	0.0160	3.0
L3P1	-178.844	56.6548	-3.16	0.0032	2.5
L3P7	537.150	193.673	2.77	0.0086	1.2
L4P4	-200.610	148.518	-1.35	0.1850	1.3
NJL2P3	165.236	90.8270	1.82	0.0770	2.4

R-SQUARED0.7841

ADJUSTED R-SQUARED0.7141

RESID. MEAN SQUARE (MSE)2054.51

STANDARD DEVIATION45.3267

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	12	2.761E+05	23006.6	11.20	0.0000
RESIDUAL	37	76016.9	2054.51		
TOTAL	49	3.521E+05			

CASES INCLUDED 50

MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF KARH5

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	-310.892	175.036	-1.78	0.0831	
L1P1	26.9272	5.50413	4.89	0.0000	2.0
L1P6	28.7796	10.8872	2.64	0.0116	4.8
L1P7	50.3900	13.8590	3.64	0.0008	5.1
L2P2	31.9797	15.2281	2.10	0.0419	2.4
L2P7	-79.7891	31.6976	-2.52	0.0158	2.7
L3P1	-170.239	58.3361	-2.92	0.0057	2.4
L3P7	534.150	193.165	2.77	0.0085	1.1
L2P5	64.1917	21.4655	2.99	0.0047	1.3

R-SQUARED0.7321

ADJUSTED R-SQUARED0.6798

RESID. MEAN SQUARE (MSE)2300.95

STANDARD DEVIATION47.9682

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	8	2.578E+05	32219.6	14.00	0.0000
RESIDUAL	41	94339.0	2300.95		
TOTAL	49	3.521E+05			

CASES INCLUDED 50

MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF KARH1

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	6878.54	734.698	9.36	0.0000	
CSFL	1.40239	0.73048	1.92	0.0622	1.4
L3P7	857.149	243.535	3.52	0.0011	1.1
L4P4	-310.036	184.482	-1.68	0.1008	1.2
L4P6	-771.860	482.789	-1.60	0.1179	1.3
NJL1P2	-451.702	80.4099	-5.62	0.0000	3.0
NJL1P3	-511.684	102.466	-4.99	0.0000	1.9
NJL1P4	-272.744	102.881	-2.65	0.0115	1.7
NJL2P3	311.498	105.537	2.95	0.0053	1.9
NJL2P7	-144.262	58.6470	-2.46	0.0184	1.9
NJL3P1	-299.118	121.659	-2.46	0.0185	1.6

R-SQUARED	0.7687	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	3516.15
ADJUSTED R-SQUARED	0.7094	STANDARD DEVIATION	59.2971

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	10	4.559E+05	45585.4	12.96	0.0000
RESIDUAL	39	1.371E+05	3516.15		
TOTAL	49	5.930E+05			

CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF KARH1

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	5462.77	533.194	10.25	0.0000	
L3P7	679.144	267.473	2.54	0.0146	1.1
NJL1P2	-351.836	69.8032	-5.04	0.0000	1.7
NJL1P3	-442.318	100.120	-4.42	0.0001	1.4
NJL2P7	-134.735	63.6878	-2.12	0.0400	1.7

R-SQUARED	0.6540	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	4559.86
ADJUSTED R-SQUARED	0.6232	STANDARD DEVIATION	67.5267

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	4	3.878E+05	96947.5	21.26	0.0000
RESIDUAL	45	2.052E+05	4559.86		
TOTAL	49	5.930E+05			

CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF BENDTSEN

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	-139.131	149.548	-0.93	0.3578	
CSFL	2.69794	0.15893	16.98	0.0000	1.3
L3P2	26.0312	14.5827	1.79	0.0818	2.6
L3P7	-83.9681	53.1209	-1.58	0.1218	1.1
L4P2	-53.4493	26.1029	-2.05	0.0472	1.9
L4P6	279.116	109.764	2.54	0.0150	1.3
NJL1P3	61.3015	23.6297	2.59	0.0132	2.0
NJL1P6	-52.4421	12.8219	-4.09	0.0002	2.5
NJL2P1	-37.0413	28.6179	-1.29	0.2030	2.6
NJL3P3	33.5530	25.1473	1.33	0.1897	1.6

R-SQUARED	0.9407	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	179.451
ADJUSTED R-SQUARED	0.9274	STANDARD DEVIATION	13.3959

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	9	1.139E+05	12652.1	70.50	0.0000
RESIDUAL	40	7178.03	179.451		
TOTAL	49	1.210E+05			

CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF BENDTSEN

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	-230.923	107.689	-2.14	0.0374	
CSFL	2.74316	0.16161	16.97	0.0000	1.3
L4P6	261.094	106.380	2.45	0.0180	1.1
NJL1P3	71.0290	21.5789	3.29	0.0019	1.5
NJL1P6	-47.1115	10.1469	-4.64	0.0000	1.5

R-SQUARED	0.9276	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	194.765
ADJUSTED R-SQUARED	0.9212	STANDARD DEVIATION	13.9558

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	4	1.123E+05	28070.5	144.12	0.0000
RESIDUAL	45	8764.43	194.765		
TOTAL	49	1.210E+05			

CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF VSK

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	97.0322	18.7816	5.17	0.0000	
CSFL	-0.05071	0.02015	-2.52	0.0163	1.6
PEKP	56.7471	30.4045	1.87	0.0699	133.4
L1P1	-0.64448	0.32662	-1.97	0.0560	6.9
L1P4	-2.18227	0.51867	-4.21	0.0002	3.5
L1P5	-1.90057	0.71634	-2.65	0.0117	9.9
L1P6	-1.98654	0.78115	-2.54	0.0153	24.2
L1P7	-3.50955	0.98766	-3.55	0.0011	25.6
L2P3	-1.11128	0.72677	-1.53	0.1348	2.6
L3P4	5.55110	3.53031	1.57	0.1244	1.8
NJL2P6	4.48751	2.53957	1.77	0.0855	2.4
NJL3P1	11.0745	4.36861	2.54	0.0156	3.0
NJL3P2	-6.21051	4.62715	-1.34	0.1877	2.9

R-SQUARED	0.8365	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	2.34957
ADJUSTED R-SQUARED	0.7835	STANDARD DEVIATION	1.53283

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	12	444.831	37.0693	15.78	0.0000
RESIDUAL	37	86.9342	2.34957		
TOTAL	49	531.765			

CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF VSK

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	83.6078	5.44145	15.36	0.0000	
L1P4	-1.17533	0.33957	-3.46	0.0012	1.1
L1P7	-1.98446	0.24252	-8.18	0.0000	1.2
NJL3P1	6.64979	2.95935	2.25	0.0295	1.0

R-SQUARED	0.7293	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	3.12990
ADJUSTED R-SQUARED	0.7116	STANDARD DEVIATION	1.76915

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	3	387.790	129.263	41.30	0.0000
RESIDUAL	46	143.975	3.12990		
TOTAL	49	531.765			

CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF OPASIT

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	85.5728	3.41369	25.07	0.0000	
CSFL	-0.00562	0.00152	-3.69	0.0007	1.4
L1P1	0.14315	0.02103	6.81	0.0000	4.3
L2P7	-0.14535	0.08831	-1.65	0.1078	3.1
L3P3	0.22481	0.14592	1.54	0.1315	1.3
L4P3	-0.39386	0.29472	-1.34	0.1892	1.7
NJL1P2	0.83202	0.25989	3.20	0.0027	7.0
NJL1P3	0.77874	0.29448	2.64	0.0117	3.5
NJL1P5	0.78497	0.31002	2.53	0.0155	8.2
NJL1P7	0.26442	0.15650	1.69	0.0991	8.7
NJL2P6	0.30711	0.18071	1.70	0.0972	1.8

R-SQUARED	0.7663	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	0.01573
ADJUSTED R-SQUARED	0.7064	STANDARD DEVIATION	0.12542

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	10	2.01152	0.20115	12.79	0.0000
RESIDUAL	39	0.61353	0.01573		
TOTAL	49	2.62505			

CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF OPASIT

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	89.5577	2.33608	38.34	0.0000	
CSFL	-0.00584	0.00152	-3.85	0.0004	1.3
L1P1	0.11905	0.01760	6.76	0.0000	2.8
NJL1P2	0.60378	0.19879	3.04	0.0040	3.9
NJL1P3	0.50326	0.23866	2.11	0.0407	2.2
NJL1P5	0.69248	0.27958	2.48	0.0172	6.3

R-SQUARED	0.7208	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	0.01666
ADJUSTED R-SQUARED	0.6890	STANDARD DEVIATION	0.12907

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	5	1.89204	0.37841	22.71	0.0000
RESIDUAL	44	0.73301	0.01666		
TOTAL	49	2.62505			

CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF ZEROVETO

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	2105.57	736.348	2.86	0.0071	
PEKP	-272.037	168.980	-1.61	0.1164	242.7
L1P1	-21.9398	7.71956	-2.84	0.0074	227.9
L1P2	-18.0648	6.89819	-2.62	0.0130	243.6
L1P3	-20.9346	6.57764	-3.18	0.0031	50.4
L1P4	-15.6954	6.36634	-2.47	0.0187	30.8
L1P5	-15.5271	6.02830	-2.58	0.0144	41.4
L1P6	-16.4993	5.49523	-3.00	0.0049	70.6
L1P7	-9.77316	5.17312	-1.89	0.0672	41.3
L2P1	-6.16707	3.99845	-1.54	0.1320	3.0
L2P3	8.08628	3.05064	2.65	0.0120	2.7
L2P7	8.49355	4.44588	1.91	0.0643	3.1
L3P5	-23.8201	12.9503	-1.84	0.0744	1.4
L4P3	16.5566	14.0292	1.18	0.2459	1.6
L4P4	-38.5014	20.1579	-1.91	0.0644	1.2

R-SQUARED	0.5403	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	39.8920
ADJUSTED R-SQUARED	0.3565	STANDARD DEVIATION	6.31601

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	14	1641.16	117.226	2.94	0.0048
RESIDUAL	35	1396.22	39.8920		
TOTAL	49	3037.38			

CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

UNWEIGHTED LEAST SQUARES LINEAR REGRESSION OF ZEROVETO

PREDICTOR VARIABLES	COEFFICIENT	STD ERROR	STUDENT'S T	P	VIF
CONSTANT	122.797	32.2493	3.81	0.0005	
L1P3	-2.77207	1.35239	-2.05	0.0467	1.9
L1P6	-2.96794	1.04685	-2.84	0.0070	2.3
L2P1	-9.62123	3.62537	-2.65	0.0112	2.2
L2P3	11.5331	2.82925	4.08	0.0002	2.1
L2P7	7.76412	3.52732	2.20	0.0333	1.7
L3P5	-28.0558	12.5678	-2.23	0.0310	1.2
L4P4	-42.4807	20.6279	-2.06	0.0457	1.1

R-SQUARED	0.3761	RESID. MEAN SQUARE (MSE)	45.1215
ADJUSTED R-SQUARED	0.2721	STANDARD DEVIATION	6.71726

SOURCE	DF	SS	MS	F	P
REGRESSION	7	1142.28	163.183	3.62	0.0039
RESIDUAL	42	1895.10	45.1215		
TOTAL	49	3037.38			

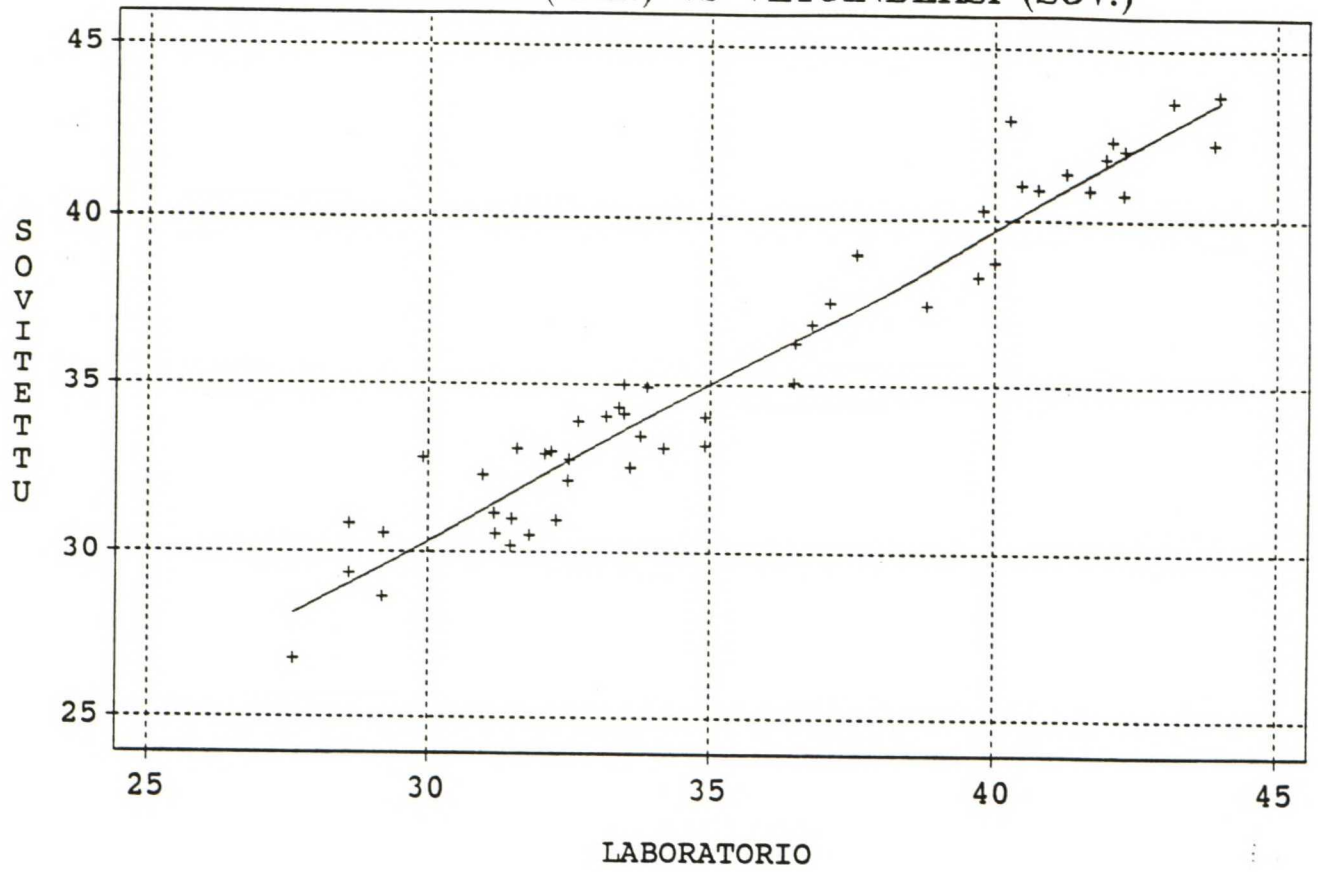
CASES INCLUDED 50 MISSING CASES 0

Liite 4 Parhaat mallien selityksasteet prosentteina eri massa-
ja arkkiominaisuuksille eri selittäjähdistelmillä

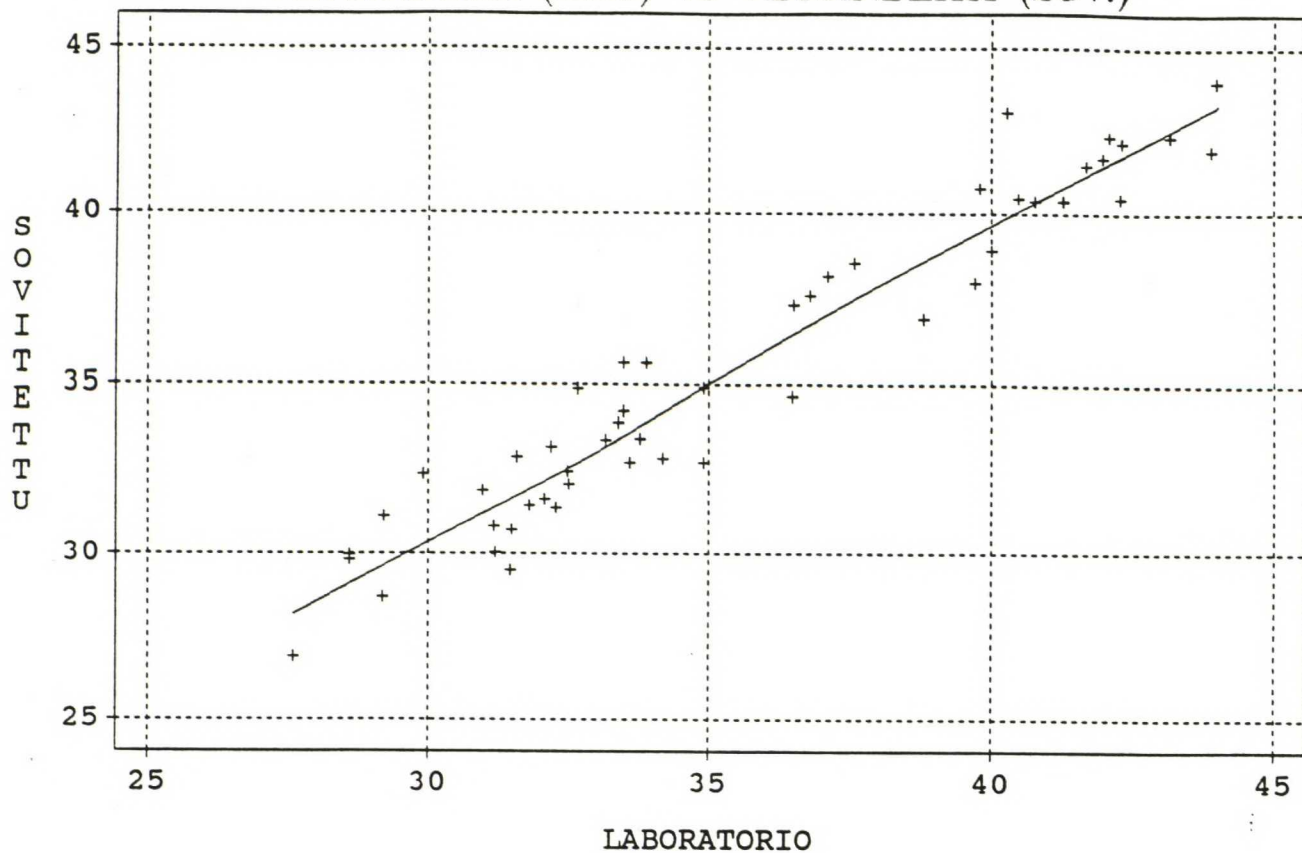
	PE-luokat PE-kuitup.	PE-luokat PE-kuitup. CSFL	PE-luokat PE-kuitup. muunnokset	PE-luokat PE-kuitup. CSFL muunnokset	yksittäiset luokat
Pulmac-tikkup.	68	71	68	72	68
R30-jae	76	77	79	79	75
R50-jae	66	66	67	67	68
R100-jae	77	77	77	77	80
R200-jae	71	74	73	77	72
P200-jae	56	59	56	59	52
vetoindeksi	90	94	91	94	87
repaisyyndeksi	93	93	93	93	93
tiheys	64	84	64	84	63
karheus (1 kp)	74	77	75	77	72
karheus (5 kp)	74	78	77	78	76
Bendtsen-il- manlapaisevyys	71	94	71	94	70
valonsironta- kerroin	86	86	86	86	84
opasiteetti	73	76	76	77	72
Zero-Span -vetolujuus	54	54	54	54	48

Liite 5 Regressioanalyysin graafiset tulokset veto- ja repäisyindeksille, tiheydelle sekä ilmanläpäisevyydelle

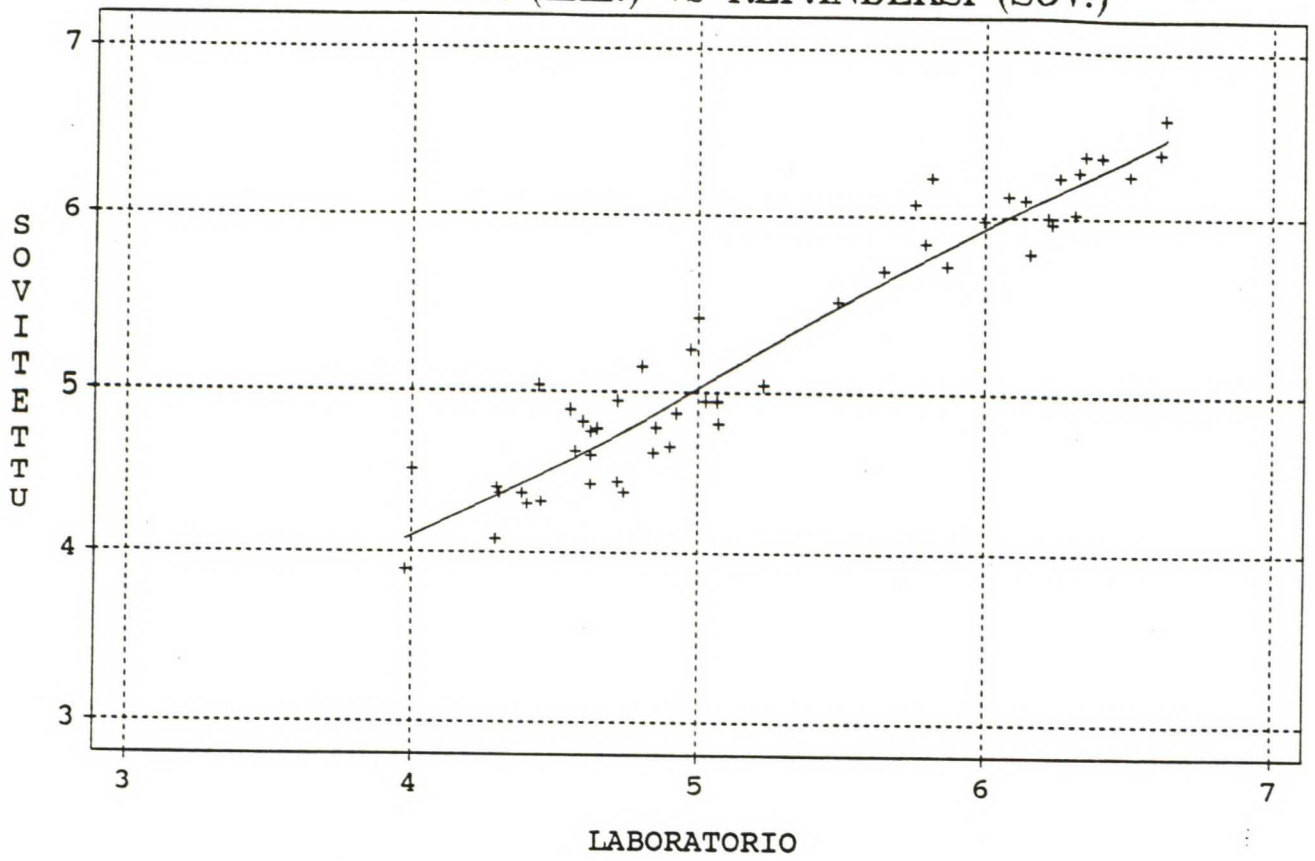
VETOINDEKSI (LAB.) vs VETOINDEKSI (SOV.)



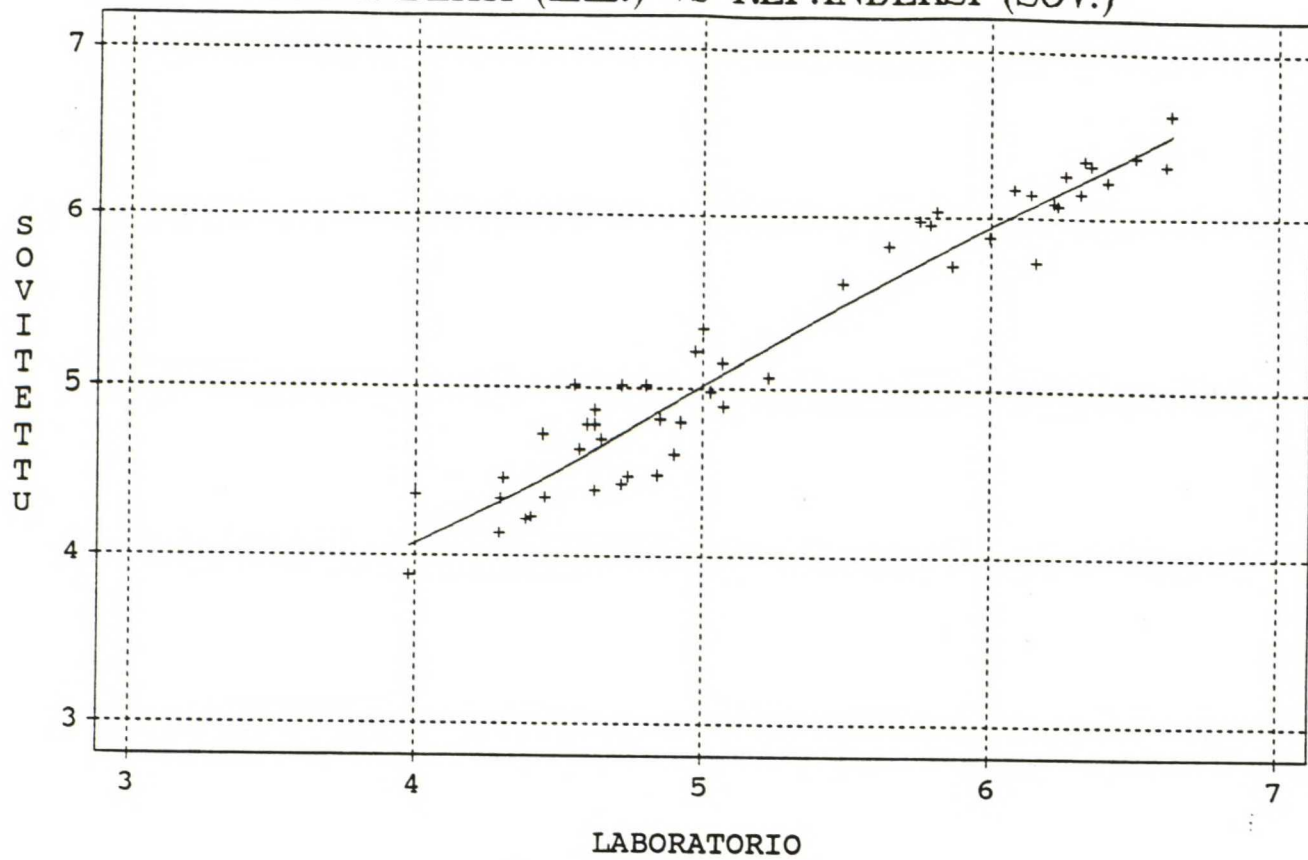
VETOINDEKSI (LAB.) vs VETOINDEKSI (SOV.)



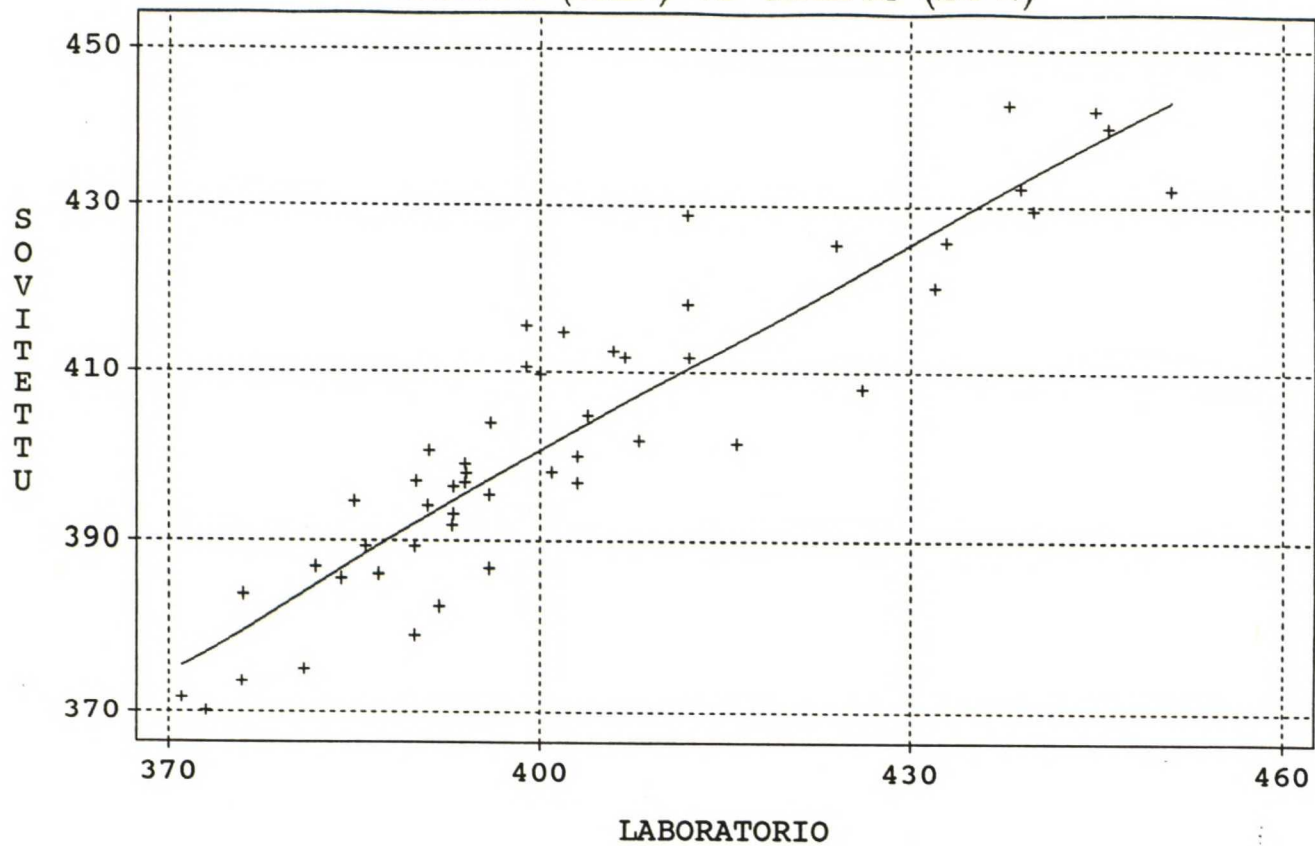
S
O
V
I
E
T
T
U



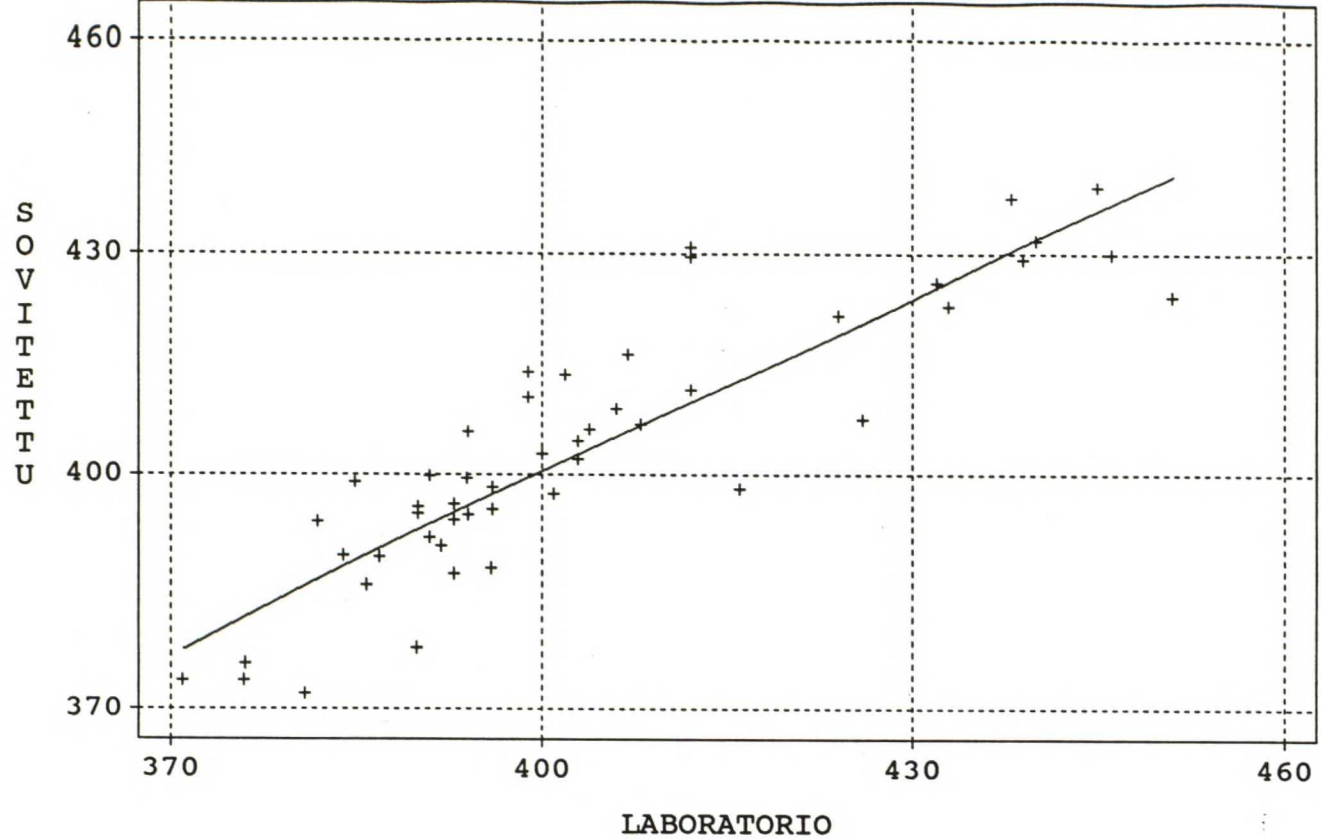
REP.INDEKSI (LAB.) vs REP.INDEKSI (SOV.)



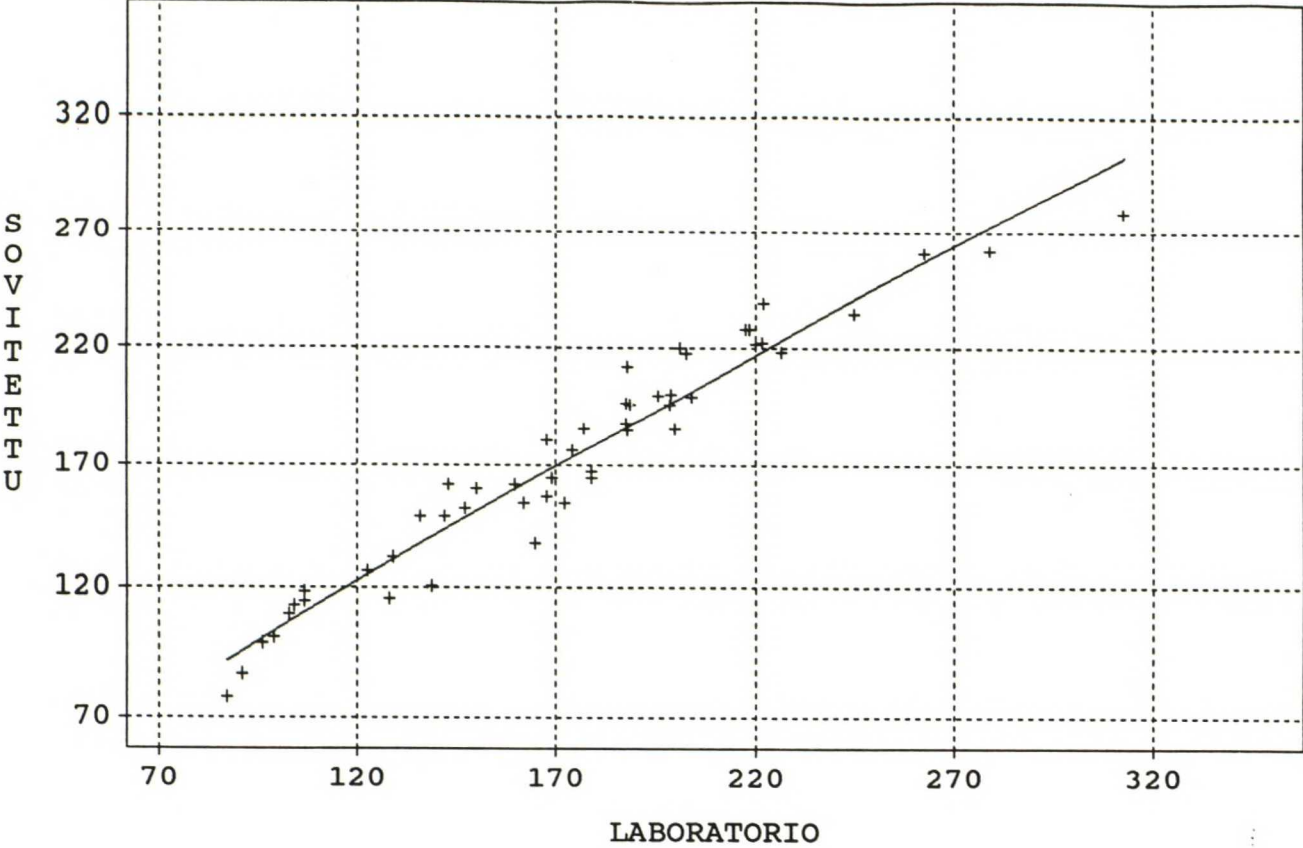
THEYS (LAB.) vs THEYS (SOV.)



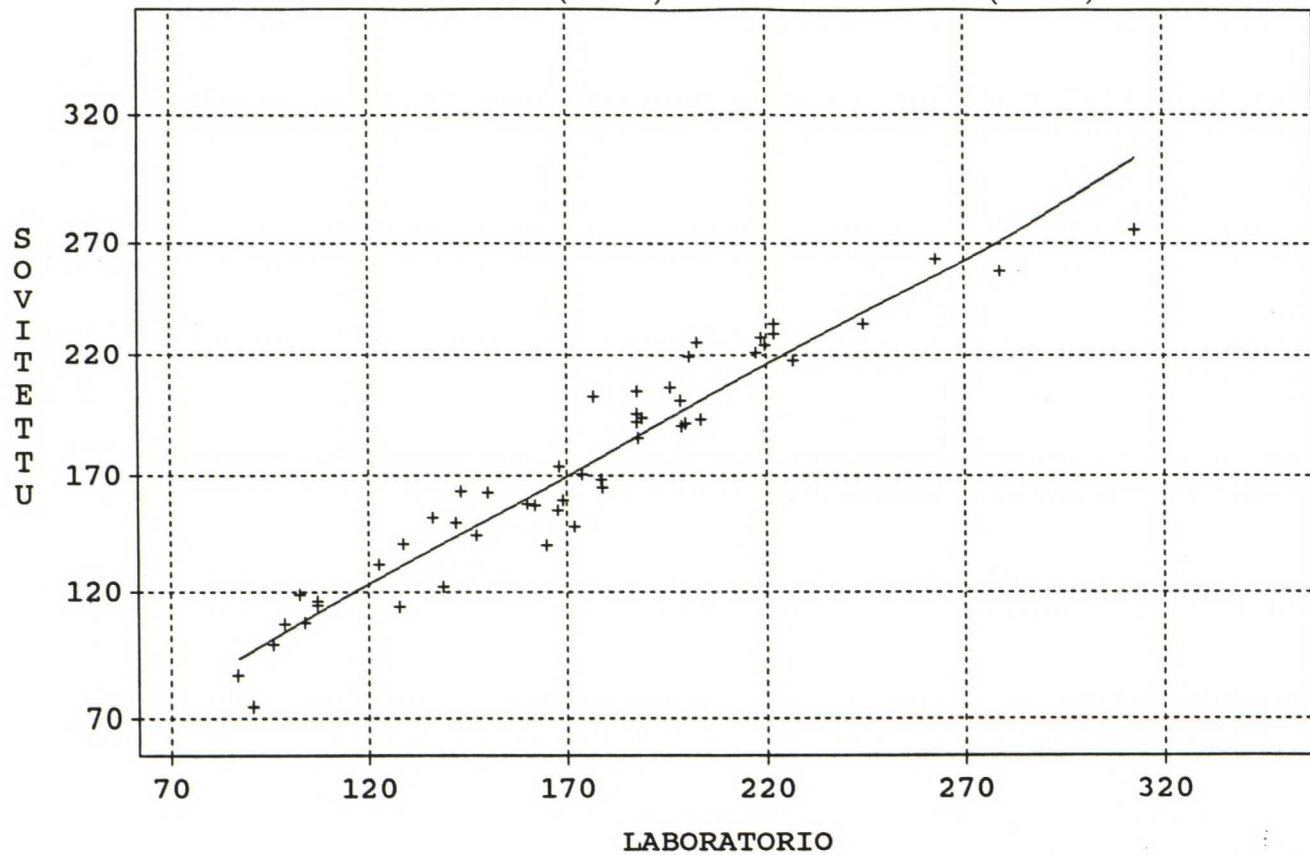
THEYS (LAB.) vs THEYS (SOV.)



BENDTSEN (LAB.) vs BENDTSEN (SOV.)



BENDTSEN (LAB.) vs BENDTSEN (SOV.)



Liite 6 Mallinmuodostuksen päätöksentekoperusteet

Regressioanalyysillä on yleensä kolme tarkoitusta:

- tutkia mahdollisia syy-seuraus -yhteyksiä
- kehittää ennustettavuussuhteita
- näiden e.m. kahden yhdistelmät

Selitysaste (R^2) ja sovitettu selitysaste (adjusted R^2) ovat regressiomallin sopivuuden mittoja. R^2 kertoo regression (riippumattomien muuttujien) selittämän riippuvan muuttujan arvon varianssin määrän. R^2 lasketaan kaavalla $1 - \text{RSS}/\text{SST}$, missä RSS = jäännösneliösumma ja SST = kokonaisneliösumma. Ongelma, johon törmää laskettaessa R^2 :a, on selitysasteen kasvaminen (jäännösneliösumman pieneneminen), kun uusi riippumaton muuttuja otetaan mukaan malliin, vaikka k.o. muuttujan ja riippuvan muuttujan välillä ei olisikaan korrelaatiota.

Sovitettu selitysaste on sovitettu riippumattomien muuttujien lukumäärään, jotta e.m. ongelma saataisiin ratkaistua, ja sen vuoksi sovitettu selitysaste onkin usein kiinnostavampi kuin selitysaste. Sovitettu R^2 lasketaan kaavalla $1 - (n - 1)\text{RMS}/\text{SST}$, jossa RMS on jäännöskeskinieliö ja n on riippumattomien muuttujien lukumäärä mallissa eli sovitettu R^2 on RMS :n monotoninen funktio.

Kun paras mahdollinen sovitettu selitysaste on löytynyt, tutkitaan, ovatko kaikki riippumattomat merkittäviä. Tähän tarkoitukseen käytetään kerrointaulukon P -arvoja, jotka kertovat, onko mallissa olevalla muuttujalla todellakin vaikutusta tutkittavaan riippuvaan muuttujaan.

LUKUSARIKPL

~~TEKNILLINEN KORKEAKOULU~~
~~Puujalostustekniikan laitos~~
~~Kirjasto~~